

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

**Ларін Олексій Олександрович**



УДК 519.216.3:539.43:678

**ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРОГНОЗУВАННЯ НАДІЙНОСТІ  
ЕЛЕМЕНТІВ МАШИН З ГУМО-КОРДНИМИ КОМПОЗИТАМИ  
ПРИ ВІДМОВАХ, ЩО ВИКЛИКАНІ ВТОМОЮ**

Спеціальність 05.02.09 – динаміка та міцність машин

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Харків – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі динаміки та міцності машин  
Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»  
Міністерства освіти і науки України, м. Харків.

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

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор,  
член-кореспондент НАН України  
**Бобир Микола Іванович**,  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського», м. Київ,  
директор механіко-машинобудівного інституту

доктор технічних наук, професор  
**Зіньковський Анатолій Павлович**,  
Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка  
НАН України, м. Київ,  
заступник директора Інституту з наукової роботи,  
завідувач відділу коливань та вібраційної надійності

доктор технічних наук, професор  
**Шупіков Олександр Миколайович**,  
Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного  
НАН України, м. Харків,  
головний науковий співробітник відділу  
формування в машинобудуванні

Захист відбудеться *«16» грудня 2016 р. о 14<sup>30</sup> год.* на засіданні спеціалізованої  
вченої ради Д 64.050.10 у Національному технічному університеті «Харківсь-  
кий політехнічний інститут» за адресою: 61002 м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного уні-  
верситету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002 м. Харків,  
вул. Фрунзе, 21

Автореферат розісланий *«14» листопада 2016 р.*

Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради Д 64.050.10



В.Г. Сукіасов

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** В сучасному машинобудуванні широко застосовуються елементи конструкцій, що виготовлені з еластомірних матеріалів та їх композитів. Зокрема досить розповсюдженими є гумові та гумо-кордні елементи. Це можуть бути спеціальні шланги та напірні рукава, які застосовуються для перекачування пульпи, суспензій, абразивних сумішей та рідин під високим тиском; компенсаторні гумові муфти трубопроводів; пневматичні шини транспортних засобів; амортизаційні прокладки тощо. Надійність перелічених елементів конструкцій є їх важливою характеристикою, що дає можливість отримати оцінки експлуатаційного ресурсу.

Гумові та гумо-кордні елементи машинобудівних конструкцій під час своєї експлуатації зазнають суттєвого зовнішнього динамічного впливу. Змінна деформація з часом призводить до накопичення втоми в матеріалі і, як наслідок, до втрати несучої здатності відповідних конструктивних елементів. Слід зазначити, що відомі експериментальні дані по залежностям кількості циклів до відмови від параметрів напружено-деформованого стану (НДС) вказують на те, що завжди існує досить суттєвий статистичний розкид у визначенні фізичних констант матеріалу. Така ситуація вимагає застосування ймовірнісних підходів у оцінці характеристик накопичення втоми в даних матеріалах.

Крім цього, однією з важливих особливостей еластомірних матеріалів, зокрема гумових сумішей, є прояв ефекту природного старіння. Відомо, що відповідні матеріали здатні істотно змінювати свої фізико-механічні властивості з часом. При чому характеристики міцності можуть змінюватись в декілька разів за номінальний термін експлуатації конструкції, навіть для елементів які не знаходяться в роботі (наприклад, під час зберігання). Отже аналіз закономірностей зміни властивостей гумових матеріалів з часом є такою самою важливою проблемою, як і дослідження їх початкових характеристик. Крім цього слід відзначити, що процеси старіння поступово прискорюють накопичення втоми.

Звичайно, процес накопичення втомних пошкоджень формується внаслідок тривалої дії циклічної зміни НДС, отже його попереднє визначення є так само важливою задачею, яка у даному випадку представляє самостійну проблему внаслідок суттєвої нелінійності, наявності криволінійної ортотропії механічних властивостей, місць внутрішньої концентрації НДС через гетерогенність будови композитів тощо.

Таким чином, науково-прикладна проблема, яка полягає у створенні нових розрахункових методів прогнозування надійності елементів машин з еластомірних матеріалів та їх композитів на основі нових ймовірнісних моделей накопичення втомних пошкоджень, що враховують наявність процесу стохастичної деградації його характеристик одночасно з накопиченням втоми, а також у створенні науково обґрунтованих підходів до вивчення параметрів НДС у відповідних елементах конструкцій є актуальною, що визначило напрям дисертаційного дослідження.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана на кафедрі динаміки та міцності машин НТУ «ХПІ» в рамках виконання держбюджетних НДР МОН України: «Розробка методів прогнозування ресурсу роторних систем з дефектами на рідинних та магнітних опорах» (ДР № 0109U002383); «Розробка теоретичних основ і методів рішення задач забезпечення міцності та надійності високонавантажених елементів машинобудівних конструкцій» (ДР № 0109U002382) та «Розробка математичних моделей і методів рішення нелінійних задач динаміки та міцності елементів конструкцій при дії квазістатичних, динамічних та ударних навантажень» (ДР № 0115U000509), де здобувач був виконавцем окремих розділів. Окремі питання дисертаційної роботи пов'язані із виконанням здобувачем досліджень в рамках Міжнародного науково-дослідного проекту “Innovative Non-Destructive Testing and Advanced Composite Repair of Pipelines with Volumetric Surface Defects (INNOPIPES) 7-ї Рамкової програми ЄС (2012-2016 pp, Contr. № PIRSES-GA-2012-318874).

**Мета і завдання дослідження.** *Мета роботи* полягає у розробці розрахункових методів прогнозування надійності та аналізу конструкційної міцності гумо-кордних композитів та їх складових, а також визначення на основі запропонованих підходів закономірностей впливу втомних таких матеріалів та їх старіння на ресурс елементів машинобудівних конструкцій в умовах експлуатації.

Для її досягнення поставлені такі *завдання*:

1. Провести аналіз сучасного стану питань щодо прогнозування надійності елементів машин з гумо-кордними композитами, визначити підходи що застосовуються для аналізу їх НДС, існуючі моделі та критерії, що визначають поступові відмови в зазначених елементах конструкцій;
2. Розробити розрахункові методи прогнозування надійності елементів машин на основі дослідження стохастичних процесів накопичення пошкоджуваності втомного матеріалу з одночасним врахуванням процесів його старіння;
3. Запропонувати математичні моделі накопичення втомної пошкоджуваності в матеріалах, що досліджуються, при їх циклічному деформуванні на скінчених деформаціях, які дозволяють врахувати випадковий розкид характеристик опору втомі та для ідентифікації її параметрів, розробити підходи визначення показників кінетики росту пошкоджуваності з експериментальних даних;
4. Провести комплекс експериментальних досліджень з визначення характеристик пружності, міцності та опору втомі в зразках з гумо-кордних композитів та їх складових і здійснити оцінку закономірностей їх зміни внаслідок протікання процесу старіння;
5. Розробити підхід та ієрархічну систему зв'язаних скінчено-елементних моделей різного масштабу розгляду гумо-кордних композитів, що дають можливість вирішувати практичні задачі щодо визначення характеристик деформування конструктивних елементів машин із урахуванням особливостей їх структури, умов експлуатації і оцінювати внутрішню концентрацію НДС;
6. Провести комплекс розрахункових досліджень, з використанням розроблених підходів до скінчено-елементного моделювання об'єктів з гумо-кордних

композитів, для визначення конструкційної міцності та ресурсу таких елементів машин:

- автомобільних пневматичних шин різних конструкцій, які забезпечували б врахування особливостей їх деформування в контакт з дорожнім покриттям, внутрішню багат шарову структуру та дозволяли б визначати їх функціонально-експлуатаційні характеристики;
- тороїдальної компенсаторної муфти-коліна промислових трубопроводів та напірного гумо-кордного рукава, що має посилення зовнішньою сталеву спіраллю;
- пружної гумо-кордної прокладки, що забезпечує амортизацію роботи технологічного устаткування та вирішити задачу раціонального проектування її внутрішньої будови.

*Об'єктом дослідження* є процеси накопичення втомної пошкоджуваності в гумових та гумо-кордних елементах машинобудівних конструкцій, що формуються при їх циклічному фізично та геометрично нелінійному деформуванні з урахуванням процесу випадкової деградації характеристик опору втомі матеріалу внаслідок старіння.

*Предметом дослідження* є параметри НДС в гумо-кордних композитах та їх складових, ймовірнісні характеристики пошкоджуваності, що описують процес накопичення втоми, а також показники експлуатаційної надійності відповідних елементів машин.

**Методи дослідження.** Основні теоретичні положення дисертації базуються на фундаментальних положеннях нелінійної теорії пружності, континуальній механіці пошкоджуваності та теорії надійності.

Для теоретичного аналізу НДС в гумо-кордних композитах та їх складових використовувався метод скінчених елементів із застосуванням сучасних програмних комплексів. Дослідження процесів накопичення пошкоджуваності проводилось в рамках концепції ефективних напружень чисельними методами, при цьому рішення диференціальних рівнянь кінетики її росту проводилось в рамках кореляційної теорії випадкових процесів, застосовувались методи математичного аналізу та теорії ймовірності.

Експериментальні дослідження проводились засобами сучасних вимірювальних комплексів Zwick/Roell Z100 та INSTRON/E3000, для обробки результатів вимірювань використовувались методи математичної статистики.

#### **Наукова новизна одержаних результатів:**

1. Вперше запропоновано розрахункові методи прогнозування надійності елементів машинобудівних конструкцій, що дозволяють визначати їх ресурс з урахуванням випадкової варіації у часі характеристик деформації, які викликають втому, стохастичного розкиду параметрів матеріалу, а також їх зміни у часі внаслідок старіння;

2. Вперше запропоновано модель кінетики росту втомної пошкоджуваності в гумових матеріалах, що на відміну від існуючих, представлена у ймовірнісній постановці та в рамках концепції континуальної механіки пошкоджу-

ваності з урахуванням геометрично та фізично нелінійної поведінки матеріалу під час циклічного деформування;

3. Створено метод визначення параметрів рівняння кінетики росту пошкоджуваності втоми на основі характеристик класичних кривих втоми та експериментально отримано дані параметри для гумових матеріалів при їх циклічному деформуванні;

4. Розроблено удосконалену математичну модель накопичення втоми в гумо-кордних матеріалах, що дозволяє досліджувати процес розвитку в них втоми з урахуванням поступової деградації його характеристик внаслідок старіння. Отримані аналітичні вирази для нестационарної функції щільності ймовірності параметру пошкоджуваності, що дозволяє визначати характеристики ресурсу;

5. Отримано нові експериментальні результати щодо впливу процесу термічного старіння гумо-кордних композитів та їх складових на механічні характеристики опору втоми та статичну міцність;

6. Набули подальшого розвитку підходи багатомасштабного моделювання НДС гумо-кордних композитних елементів конструкцій які полягають у створенні ієрархічної системи розрахункових скінчено-елементних моделей з різною деталізацією внутрішньої будови композиту. Відповідна система є зв'язаною, таким чином, що моделі макрорівня інтегрально представляють композит, як ортотропний однорідний матеріал та надають можливість вирішувати практичні задачі з урахуванням особливостей конструкції, граничних умов, експлуатаційного навантаження тощо, а моделі мікрорівня дозволяють оцінювати внутрішню концентрацію напружень та деформацій.

**Практичне значення** одержаних результатів для машинобудування складають підходи до побудови моделей деформування елементів машин з гумо-кордними композитами та методики проведення на їх основі розрахунків характеристик експлуатаційної надійності відповідних конструкцій, які реалізовані у вигляді пакету скриптового програмного забезпечення, а також у виді розроблених інтегрованих інформаційних системах САПР.

Вирішено практичні задачі для оцінки міцності та надійності пневматичних шин легкових автомобілів, гумо-кордних амортизаційних прокладок та високо-напірних гумових шлангів. Отримані оцінки по строку служби дозволяють попередити раптові відмови, спланувати проведення ремонтних робіт та графіки технічних оглядів відповідних машин.

Розроблено інформаційну систему, яка дозволяє автоматизувати процес побудови геометрії та створення розрахункових моделей пневматичних шин для широко класу їх типорозмірів та конструктивних варіацій. Отримано свідоцтво про авторське право на науковий твір в якому викладено архітектуру даної інформаційної системи та алгоритми для автоматизованого проектування пневматичних шин. Результати досліджень щодо формування особливостей утворення циклів деформацій пневматичних шин із різним внутрішнім тиском увійшли до комплексу засобів спрямованих на керування шинами колісних

транспортних засобів, який оформлено у вигляді патенту України на корисну модель (Пат. № 101841).

Створено інформаційну систему формування раціональної внутрішньої будови гумо-кордної багатошарової амортизаційної прокладки, яка дозволяє визначати характеристики їх кордного посилення (просторове розташування та орієнтацію по прошаркам) з тим, аби забезпечити менші рівні напружень та підвищити ресурс і функціональні характеристики відповідних елементів.

На основі запропонованих підходів до аналізу показників надійності елементів машинобудівних конструкцій, що мають змінні у часі показники НДС та/або характеристики опору втомі матеріалів, проведено прогноз експлуатаційного та залишкового ресурсу гумо-кордних шлангів та криволінійних муфт.

Результати наукових досліджень впроваджено в практику проектно-дослідних робіт провідних вітчизняних підприємств машинобудівної галузі України ПрАТ «РОСАВА» (м. Біла Церква, Київська обл.) та ПрАТ «ІнтерМікро Дельта, Інк» торгівельна марка «Дніпрошина» (м. Дніпро); ПАТ «АвтоКрАЗ» (м. Кременчук), а також в навчальний процес: Національним технічним університетом «Харківський політехнічний інститут» (м. Харків) та Національним транспортним університетом (м. Київ).

**Особистий внесок здобувача.** Положення і результати, що виносяться на захист дисертаційної роботи, отримані здобувачем особисто. Серед них: розрахунковий метод прогнозування ймовірнісних характеристик ресурсу механічної системи з врахуванням стохастичного процесу зменшення у часі границі втомної міцності матеріалу та експлуатаційної варіації характеристик НДС; ймовірнісна модель накопичення пошкоджуваності втомі в матеріалах, що пружно деформуються із скінченими рівнями амплітуд деформацій; підхід до багато-масштабного скінчено-елементного моделювання елементів машинобудівних конструкцій з гумо-кордних композитів; експериментальні дослідження параметрів пружності, статичної міцності та ймовірнісних характеристик відмов утоми гумових сумішей до та після її штучного старіння; результати експериментальних дослідження, щодо визначення пружних та міцнісних характеристик гумових композитів, які мають посилення односпрямованим текстильним кордом; методологія побудови розрахункової моделі пневматичної шини, що дозволяє врахувати криволінійну ортотропію механічних властивостей в тривимірній постановці з урахуванням геометричної та фізичної нелінійностей деформування шини в контакті з дорожньою основою; розроблена методологія багато-масштабного скінчено-елементного моделювання криволінійних напірних шлангів та компенсаторних муфт, підходи та алгоритми вивчення їх функціональних характеристик, а також теоретичні основи розрахунку характеристик надійності, зокрема із врахуванням деградації характеристик матеріалів у часі; розроблені алгоритми та специфікації програмного забезпечення для САПР побудови пневматичних шин та інших багатошарових гумо-кордних машинобудівних конструкцій.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертації, результати та висновки обговорено на: Міжнародних науково-практичних конфе-

ренціях «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я (MicroCAD)» (м. Харків, 2010, 2012-2016 рр.); XIV та XVI Міжнародних науково – технічних конференціях «Автомобільний транспорт: проблеми та перспективи» (м. Севастополь, 2011 р., 2013 р.); III-й конференції «Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій» (м. Львів, 2012 р.); IV-й Міжнародній конференції «Nonlinear dynamics» (м. Севастополь, 2013 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Втома та термовтома матеріалів та елементів конструкцій» (м. Київ, 2013); XI Міжнародного симпозіуму українських інженерів-механіків у Львові» (м. Львів, 2013 р.); на семінарі з механіки (Aachen Mechanic Seminar) в Технічному Університеті Аахена, (м. Аахен, Німеччина, 2014 р.); науковому семінарі по Міжнародному проекту INNOPIPES, який проходив в рамках Міжнародної конференції «Дни не разрушающего контроля - 2014» (м. Созополь, Болгарія, 2014 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми надійності машин і засобів механізації сільськогосподарського виробництва» (м. Харків, 2014 р., 2015 р.); Міжнародній конференції «Современные проблемы естественных наук - Тараповские чтения» (м. Харків, 2014 р., 2016 р.); V Міжнародній науково-технічних конференції «Науково-прикладні аспекти автомобільної і транспортно-дорожньої галузей» (м. Луцьк, 2016р.).

У повному обсязі дисертація була розглянута на засіданні кафедри динаміки і міцності машин та опору матеріалів Національно технічного університету України "Київський політехнічний інститут" (2016 р.), на розширеному засіданні кафедри динаміки та міцності машин Національного Технічного Університету "Харківський політехнічний інститут" (2015 р. та 2016 р.), а також на сесії наукової ради з проблем механіки деформівного твердого тіла НАН України (м. Кременчук, 2016 р.).

**Публікації.** Основні наукові положення і результати досліджень по темі дисертаційної роботи опубліковано в 49 наукових працях: 28 у наукових фахових виданнях України (10 у наукометричних базах), 7 у закордонних фахових наукових виданнях англійською мовою (4 – у наукометричній базі Scopus), 1 Патент України на корисну модель, 1 – свідоцтво про авторське право на твір та 12 – у матеріалах конференцій.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, 7-ми розділів, висновків, списку використаних джерел інформації та додатків. Повний обсяг дисертації складає 363 сторінок, з них 140 рисунків по тексту, 19 рисунків на 12 окремих сторінках; 21 таблиця по тексту, 6 додатків на 29 сторінках і 399 найменувань використаних науково-технічних джерел інформації на 44 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність, теоретичну та практичну цінність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та задачі дослідження роботи, охарактеризовано новизну і практичну значимість наукових результатів, пред-

ставлено дані про зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами, наведено інформацію про апробацію роботи та публікації основних результатів.

У **першому розділі** представлено аналіз конструктивних особливостей типових гумових та гумо-кордних елементів, що використовуються в сучасному машинобудуванні. Визначено умови їх експлуатації, характерні типи відмов та причини, що їх викликають. Проаналізовано сучасні наукові роботи, які присвячені створенню математичних моделей характеристик НДС в даних елементах та методи їх аналізу. Зокрема детально проаналізовано особливості робото-здатності гумових напірних шлангів та з'єднувальних муфт, гумо-кордних амортизаційні прокладок, а також пневматичних шини сучасних транспортних засобів в умовах інтенсифікації режимів експлуатації.

Відзначені внески науковців, що займалися дослідженнями характеристик НДС та надійності відповідних машинобудівних елементів, серед яких: Бідерман В.Л., Белкін А.Е., Бухін Б.Л., Григолюк Е.І, Дмитриченко М.Ф., Кравченко О.П., Карпенко В.О., Кваша Е.Н., Кіричевський В.В., Кнороз В.И., Мухін О.М., Науменко О.П., Прісс Л.С., Победа Б.Є., Шешеніна С.В., Шупіков О.М., а також Akasaka T., Baldwin J.M., Cho J.R., Clark S.K., Fervers C.W., Huang S.C., Kaliske M., Kim B.S., Kim Y.J., Larsson K., Li D., Matsuzaki R., Nackenhorst U., Pelc J., Rasejka H.B., Yan X. та інші.

В даному розділі представлено огляд сучасного стану з питань оцінки характеристик втоми, зокрема для гумо-подібних матеріалів та гумо-кордних композитів. Проаналізовано традиційні підходи до визначення характеристик опору втоми відповідних матеріалів, що базуються на використанні рівняння Велера. Розглянуто питання оцінки ресурсу по втомі для машинобудівних конструкцій в яких циклічна зміна характеристик НДС відбувається із змінною амплітудою. Наведено огляд існуючих моделей для опису процесу накопичення втомної пошкоджуваності. Серед авторів, що займаються відповідними питаннями відзначено таких вчених: Афанасьєв М.М., Біргер І.А., Болотін В.В., Бобир М.І., Гусєв А.С., Зіньковський А.П., Качанов Л.М., Когаєв В.П., Лебедев А.А., Львов Г.І., Можаровський М.С., Писаренко Г.С., Работнов Ю.Н, Сосновський Л.А., Серенсен С.В., Стрижало В.А., Трощенко В.Т., а також закордонних вчених Abraham F., André N., Ayoub G., Cadwell S.M., Chaboche J.L., Desmorat R., Fatemi A., Gent A.N., Grosch K., Halford G.R., Harris B., Lee M.P., Lemaître J., Manson S.S., Mars W.V., Murakami S. Moet A., Ro H.S., Sun C., Wang B., Wöhler A., Yang L. та інших. Встановлено, що процеси накопичення втоми при циклічному деформуванні із змінною амплітудою найбільш якісно (в тому числі і для складного НДС) описують математичні моделі на основі використання континуальної механіки пошкоджуваності. Відзначено необхідність подальшого їх вдосконалення, зокрема для врахування існуючих істотних розкидів експериментальних значень по характеристикам матеріалів та можливої експлуатаційної варіація навантаження.

У розділі також представлено аналіз сучасних підходів до прогнозування механічної надійності елементів машинобудівних конструкцій. Відмічені вчені, які зробили вагомий вклад у розвиток теорії надійності: Анілович В.Я., Бір-

гер І.А., Болотін В.В., Гусєв А.С., Грінченко О.С., Жовдак В.О., Канарчук В.Є., Кухтов В.Г., Светлицький В.О., Переверзєв Є.С., Проніков А.С., Райзер В.Д., Тімашев С.А., Collins K.R., Cornell C.A., Freudenthal A.M., Kesecioglu D.B., Manson S.S., Nowak A.S., Nikolaidis E., Pham H., Rao S.S., Shinozuka M., Yang G. та інші. Аналіз науково-технічних літературних джерел з цієї тематики показує, що існуючі моделі та методи оцінки ресурсу потребують подальшого розвитку враховуючи те, що в еластомірних матеріалах протягом роботи протікають процеси деградації їх механічних характеристик внаслідок старіння. Наведено огляд робіт із результатами експериментальних досліджень стосовно впливу старіння на зміну характеристик міцності та пружності в гумових матеріалах.

Таким чином, вирішення проблеми прогнозування надійності гумо-кордних елементів машинобудівних конструкцій при поступових відмовах потребує подальшого розвитку, зокрема існує доцільність використання нелінійних моделей накопичення пошкоджуваності втомі з врахування одночасного протікання процесів старіння та наявності випадкового розкиду характеристик опору втомі матеріалу, а також експлуатаційної варіації характеристик НДС.

У **другому розділі** здійснено математичну постановку задачі визначення характеристик НДС гумових та гумо-кордних елементів машинобудівних конструкцій.

Характерною особливістю відповідних елементів є те, що під дією зовнішнього навантаження гумові матеріали здатні відтворювати скінчені деформації, що призводить до необхідності враховувати геометричну та фізичну нелінійність. Введені міри деформації та характеристики напруженого стану в точці тіла (тензори Коші та Піола-Кірхгофа і зв'язок між ними), їх характеристики та співвідношення нелінійної теорії пружності. Обґрунтовано вибір фізичних співвідношень для вирішення практичних задач в даній дисертації. При цьому обрано модель неогуківського пружного потенціалу та потенціал Муні-Рівліна. Показано межі застосування зазначених моделей, а також обґрунтовано припущення щодо достатності використання лінійних фізичних співвідношень для оцінки деформування композитних гумо-кордних шарів із текстильним посиленням, в рамках вирішення практичних задач щодо визначення загального деформування відповідних елементів конструкцій в експлуатаційних умовах.

Вирішення практичних задач щодо достовірної оцінки характеристик НДС для реальних машинобудівних конструкцій на основі сформованої математичної моделі поруч з необхідністю врахування особливостей тривимірної геометрії конструкції, наявності багатошарової структури з неоднорідними властивостями окремих шарів, виконується на основі методу скінчених елементів (МСЕ) із застосуванням відповідних програмних комплексів.

В рамках МСЕ розглянута математична постановка задачі перетворюється на нелінійну матричну проблему, розв'язок якої визначається ітеративно в рамках методу Ньютона-Рафсона:

$$[K_t]_{\{q\}=\{q^k\}} \{\Delta q^k\} = \{F_{int}\}_{\{q\}=\{q^k\}} + \{F_{ext}\}_{\{q\}=\{q^k\}}, \quad \{q^{k+1}\} = \{q^k\} + \{\Delta q^k\}, \quad (1)$$

де  $\{q\}$  – вектор вузлових переміщень,  $\{q^k\}$  –  $k$ -е наближення до розв'язку,  $\{\Delta q^k\}$  – шуканий вектор приросту вузлових переміщень до наступного  $(k+1)$ -го на-

ближення,  $[K_t]$  – матриця дотичної жорсткості, яка розрахована навколо попередньо визначеного наближення  $\{q^k\}$ ,  $\{F_{int}\}$  – вектор умовних вузлових внутрішніх сил («сили Ньютона-Рафсона»),  $\{F_{ext}\}$  – вектор зовнішніх вузлових сил. Матриця жорсткості СЕ, що формує глобальну матрицю дотичної жорсткості визначається як:

$$[K_t^e] = \iiint_{V_e} [B_1]^T [C] [B_1] \Big|_{\{q\}=\{q^k\}} dV + \iiint_{V_e} [B_0]^T [S_0] [B_0] \Big|_{\{q\}=\{q^k\}} dV, \quad (2)$$

$$\left. \{F_{int}^e\} \right|_{\{q\}=\{q^k\}} = \iiint_{V_e} [B_1]^T \{S\} dV \Big|_{\{q\}=\{q^k\}}, \quad \{F_{ext}^e\} = \iint_{S_e} [N]^T \{p\} dS, \quad (3)$$

де  $[S_0]$  – блочно-діагональна матриця, що утворена з компонентів тензору напружень Піола-Кірхгофа, які розраховані на попередній ітерації алгоритму;  $[B_1]$  та  $[B_0]$  – матриці похідних від функцій форм СЕ,  $[N]$  – матриця функцій форм скінченного елемента.  $[C]$  – представляє собою матричне представлення тензору четвертого порядку, яким є похідна від тензору напружень по тензору деформацій. Дана матриця називається матрицею дотичної жорсткості матеріалу.

Слід зазначити, що вирішення практичних задач з оцінки НДС гумо-кордних елементів конструкцій у зазначеній постановці супроводжується проблемами збіжності чисельних процедур пошуку рішення для моделей із великою розмірністю, що формуються внаслідок застосування дрібних СЕ сіток. Окрім проблем із збіжністю існує ще й проблема врахування впливу кордного посилення в композитних елементах. Наявність неоднорідності внутрішньої структури (посилення кордом) призводить з одного боку до ортотропії пружних властивостей певних частин цих конструкцій, а з іншого боку суттєво ускладнює аналіз напруженого стану, оскільки виникають зони внутрішньої концентрації напружень. Врахувати явним чином наявність корду для реальної практичної задачі є неможливим, бо це додатково збільшує розмірність задачі. Для вирішення вище зазначених проблем, в даній роботі запропоновано використати підхід ієрархічного багато-масштабного моделювання (рис. 1)

Відповідно до підходу проблема розв'язується у декілька етапів:

- на першому етапі вирішується попередня допоміжна задача щодо визначення усереднених інтегральних ортотропних характеристик композиту методами гомогенізації в рамках задач мікро-механіки композитів. Тобто формується презентативний об'ємний елемент композиту з явним моделюванням наявності корду. На основі даної моделі проводиться серія розрахункових досліджень, які імітують набір випробувань на одновісну деформацію даного елемента з подальшим усередненням НДС по об'єму даного презентативного елемента. Результати цих розрахункових випробувань дають можливість отримати усереднені ортотропні характеристики гумо-кордного композиту;

- на другому етапі проводиться розрахунок цілої машинобудівної конструкції, що найбільш повно враховує експлуатаційні особливості конструкції, умови її роботи, розподіл навантаження та особливості кріплення. Композитні елементи задаються гомогенним матеріалом з ортотропними пружними властивостями, орієнтація яких повторює особливості геометрії конструкції.

Звичайно така модель будується з досить грубою СЕ сіткою та із спрощеним врахуванням композитних шарів, що не дає достовірної картини щодо НДС, але є достатньою для отримання якісної картини загального деформування (переміщень точок конструкції);

– на наступних етапах, з повної розрахункової моделі вилучається певна її частина. В якості додаткових кінематичних граничних умов використовуються результати розрахунків по переміщенням, що були отримані на попередньому етапі моделювання. Це дозволяє застосувати більш дрібну сітку та отримати уточнені результати по деформаціям для частини конструкції, не збільшуючи розмірності повної моделі. Таких етапів може бути декілька, при цьому формується зв'язана ієрархічна система уточнюючих моделей.

На останньому етапі уточнення вже зі зменшеної частини конструкції пропонується виділяти презентативний об'єм навколо найбільш навантаженої частини конструкції. В рамках моделі даного рівня доцільно будувати явним чином кордні елементи, що дозволяє оцінити рівень внутрішньої концентрації деформацій, яка формується внаслідок неоднорідності структури композиту.

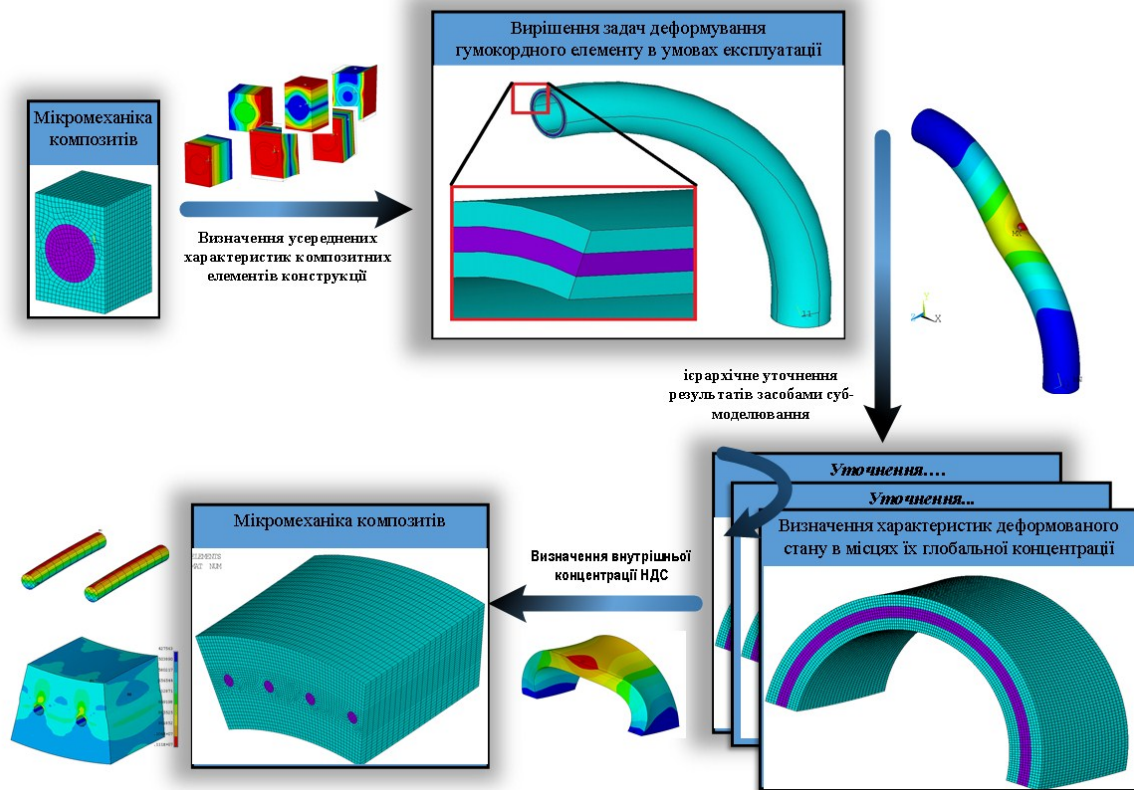


Рисунок 1 – Схема ієрархічного багато-масштабного моделювання гумо-кордних елементів машинобудівних конструкцій

**Третій розділ** присвячено розробці ймовірнісної моделі накопичення пошкоджуваності втоми в гумо-подібних матеріалах. Дослідження процесу накопичення втоми пропонується проводити в рамках теорії континуальної механіки пошкоджуваності.

Для оцінки процесу накопичення втоми в роботі застосовується скалярний параметр пошкоджуваності  $D$ , який вважається параметром стану матеріа-

лу, що входить як незалежна змінна у формулювання функції вільної енергії та дисипативного потенціалу матеріалу, пошкоджуваність якого розглядається.

Кінетику росту пошкоджуваності пропонується представляти у вигляді степеневого закону для асоційованої до параметру пошкоджуваності змінної  $Y$  (швидкість вивільнення енергії деформації при пошкодженні), яка при ізотермічному втомному пошкодженні матеріалу може бути визначена через функцію щільності енергії деформації<sup>1</sup>  $W$ :

$$\frac{dD}{dt} = B \cdot (-Y)^c, \quad Y = -\frac{\partial W}{\partial D}. \quad (4)$$

Для нелінійно пружного матеріалу функція щільності енергії деформації визначається через інваріанти тензорів деформації або через головні подовження ( $\lambda_i$ ), які внаслідок наявності накопичення втоми матеріалу мають залежати від параметру пошкоджуваності<sup>2</sup>, тому

$$Y = -\frac{\partial W}{\partial D} = -\sum_{i=1}^3 \frac{\partial W}{\partial \lambda_i} \cdot \frac{\partial \lambda_i}{\partial D}. \quad (5)$$

Залежність функції щільності енергії деформації (яка фактично визначає фізичні співвідношення для матеріалу) від параметру пошкоджуваності вводиться в рамках концепції ефективних напружень. Тобто вважається, що існуючі фізичні співвідношення для непошкодженого матеріалу зберігаються, але повинні бути виписані для ефективних значень НДС, які в роботі визначаються у сенсі Работнова-Качанова

$$\tilde{S}_{ij} = \frac{S_{ij}}{1-D}, \quad (6)$$

де визначення ефективних напружень ( $\tilde{S}_{ij}$ ) дано для напружень 2-го тензору Піола-Кірхгофа, що відповідає теорії пошкоджуваності для матеріалів зі скінченими деформаціями. Виразом (6) також формулюються ефективні головні значення тензорів напружень. У цьому випадку можна аналітично визначити для похідних ефективних головних напружень 2-го тензору Піола-Кірхгофа  $S_i$  по параметру пошкоджуваності, який дозволяє отримати рівняння для кінетики накопичення втомної пошкоджуваності матеріалів при скінчених деформаціях у класичному виді:

$$\frac{dD}{dt} = B \cdot \left( \frac{S_{eq}}{1-D} \right)^c, \quad (7)$$

$$S_{eq} = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial W}{\partial \lambda_i} \tilde{S}_i \cdot \left[ \frac{\partial \tilde{S}_i}{\partial \lambda_i} \right]^{-1} = \sum_{i=1}^3 \lambda_i \tilde{S}_i^2 \left[ \frac{\partial \tilde{S}_i}{\partial \lambda_i} \right]^{-1}, \quad (8)$$

де  $S_{eq}$  – може розглядатись як еквівалентні напруження, які дозволяють характеризувати накопичення втоми при складному НДС.

<sup>1</sup> Lemaitre J. Engineering damage mechanics / J. Lemaitre. – Berlin/Heidelberg : Springer-Verlag, 2005. – 395 p.

Murakami S. Continuum damage mechanics / S. Murakami. — Springer, 2012. — 423 p.

<sup>2</sup> Ayoub G. Multiaxial fatigue life prediction of rubber-like materials using the continuum damage mechanics approach / G. Ayoub, M. Naït-abdelaziz, F. Zaïri, J. M. Gloaguen // Procedia Engineering. – 2010. – Vol. 2, No. 1. – P. 985–993.

В даній роботі використовувалась функція щільності енергії деформації для матеріалу Муні-Рівліна. Отримано вираз для визначення еквівалентних напружень через інваріанти тензора деформації Гріна та головні подовження

$$S_{eq} = \sum_{i=1}^3 \frac{(2C_{01}J^{2/3}[I_1 - 3\lambda_i^2] + 2C_{10}[3J^2\lambda_i^{-2} - I_2] - 3kJ^{7/3}[J-1])^2}{(8C_{01}J^{2/3}[2I_1 - 3\lambda_i^2] + 8C_{10}[6J^2\lambda_i^{-2} - I_2] + 9kJ^{7/3}) \cdot J^{4/3}}, \quad (9)$$

де  $C_{01}$ ,  $C_{10}$  та  $k$  – константи матеріалу;  $I_1$  та  $I_2$  – перший та другий інваріанти тензору деформацій Гріна, а  $J$  – визначник цього тензору який є квадратним коренем з його третього інваріанту. Отже використання (7) разом із еквівалентними напруженнями (9) дозволяють аналізувати процес накопичення втоми в гумових матеріалах при складному НДС на скінчених деформаціях.

Запропонована модель процесу накопичення втоми до визначається експериментальними даними. Для цього пропонується використовувати класичну криву Велера, що пов'язує амплітудні значення еквівалентного параметру НДС (критерій, що застосовується для оцінки міри накопичення пошкоджуваності) та кількість циклів деформації до відмови

$$S_{eq}^m \cdot N = S_c^m N_0 = \text{const}, \quad (10)$$

де  $N$  – кількість циклів до руйнування зразку при його деформуванні з амплітудою  $S_{eq}$ ,  $m$ ,  $N_0$  та  $S_c$  – константи, що визначаються експериментально.

Рівняння Велера (10) із визначеними його константами дозволяє безпосередньо визначити час до відмови зразку на певному фіксованому рівні навантаження. З іншого боку формальний розв'язок рівняння (7) в умовах простого тесту на втому (цикли з постійною амплітудою) так само дає можливість визначити час до відмови, шляхом його інтегрування. Порівняння цих рішень дає значення для констант рівняння (7):

$$c = m, \quad B = \frac{\omega_e}{S_{eq}^m \cdot N_0 \cdot (m+1)}. \quad (11)$$

Враховуючи, що відомі експериментальні дані по кількості циклів до відмови для гумо-кордних композитів та їх складових мають істотний розкид своїх значень, пропонується моделювати процес накопичення втомної пошкоджуваності у ймовірнісній постановці. Для цього базова кількість циклів до відмови  $N_0$  вважається випадковою величиною, що задовольняє нормальному закону Гауса з середнім значенням  $\langle N_0 \rangle$  та коефіцієнтом варіації  $V_{N_0}$ . Таким чином, процес накопичення пошкоджуваності при втомі гумових матеріалів описується диференціальним рівнянням (7) із константами, що визначаються з (11) та має випадковий параметр. Пошкоджуваність за такого моделювання представляє собою випадковий процес.

Нелінійність рівняння (7) ускладнює можливості для його безпосереднього усереднення з тим, аби визначити ймовірнісні характеристики пошкоджуваності. Для рішення даної проблеми пропонується ввести заміну

$$U(t) = \left[ 1 - (1 - D)^{m+1} \right] \frac{1}{m+1}, \quad (12)$$

яка дозволяє отримати лінійне диференціальне рівняння відносно введеної функції  $U(t)$  з випадковим параметром  $\chi$ :

$$\frac{dU}{dt} = \frac{\omega_e \cdot \chi^{-1}}{\langle N_0 \rangle (m+1)} \left( \frac{S_{eq}}{S_{eqc}} \right)^m, \quad \chi = \frac{N_0}{\langle N_0 \rangle}. \quad (13)$$

Ймовірнісні характеристики розв'язку цього рівняння (характеристики процесу  $U(t)$ ), визначаються безпосереднім усередненням:

$$\langle U(t) \rangle = \left\langle \int_0^t \frac{\omega_e \chi^{-1}}{\langle N_0 \rangle (m+1)} \left( \frac{S_{eq}}{S_{eqc}} \right)^m dt \right\rangle = \psi \cdot \langle \chi^{-1} \rangle \cdot t = k_1 \cdot t, \quad \psi = \frac{\omega_e}{\langle N_0 \rangle (m+1)} \left( \frac{S_{eq}}{S_{eqc}} \right)^m, \quad (14)$$

$$\sigma_U^2(t) = \psi^2 \cdot \langle \chi^{-2} \rangle \cdot t^2 - k_1^2 \cdot t^2 = k_2^2 \cdot t^2. \quad (15)$$

Враховуючи, що процес  $U(t)$  є адитивною функцією, то посилаючись на центральну граничну теорему теорії ймовірностей вводиться гіпотеза про те, що дана щільність ймовірності даного процесу має задовольняти нормальному закону Гауса (особливо для значень часу близьких до відмови: оскільки у цьому випадку в інтегральній сумі буде достатньо велика кількість членів ряду). Використання алгебраїчного зв'язку, що існує між пошкоджуваністю  $D$  та функцією  $U$  (вираз (12)) отримано аналітичний вираз для одновимірної функції щільності ймовірності пошкоджуваності, як нестационарного випадкового процесу

$$f_D(D, t) = \frac{(m+1)(1-D)^m}{\sqrt{2\pi}\sigma_U(t)} \exp \left[ -\frac{(1 - (1-D)^{m+1} - \langle U(t) \rangle)^2}{2\sigma_U^2(t)} \right]. \quad (16)$$

Вираз (18) дає можливість розрахувати математичне очікування процесу накопичення пошкоджуваності  $\langle D \rangle$  при фіксованому рівні амплітуд навантаження, а також довірчий інтервал  $\Omega_D$  можливої варіації цього процесу із заданою довірчою ймовірністю  $\beta$  ( $\beta = 0,99$ ).

$$\langle D(t) \rangle = \int_0^\infty D \cdot f_D(D, t) dD \quad (17)$$

$$\text{Pr}[D \in \Omega_D = (D_{\min}, D_{\max})] = \gamma, \quad D_{\max} : \frac{\gamma}{2} = \int_0^{D_{\max}} f_D(D, t) dD, \quad D_{\min} : \gamma = \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} f_D(D, t) dD, \quad (18)$$

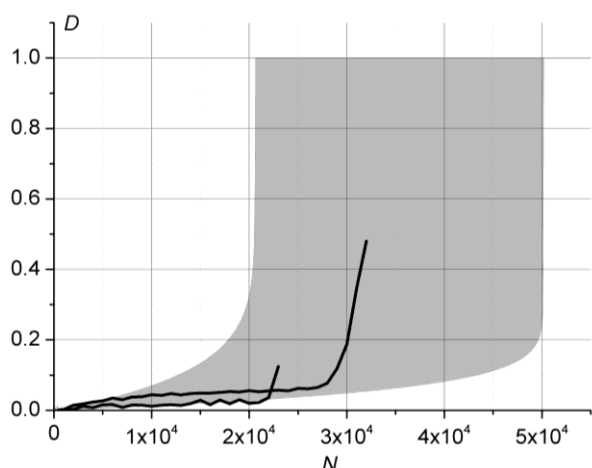
де  $\text{Pr}[\dots]$  – оператор розрахунку ймовірності. Відповідно до формул (18) границі довірчого інтервалу розраховувались ітераційно для кожного значення часу  $t$ . Спочатку визначається верхня межа шляхом серії розрахунків першого з інтегралів у формулі (18) поки його значення не досягне половини значення довірчої ймовірності. Наступним кроком була аналогічна процедура по визначенню нижньої границі.

На рис. 2 представлені області довірчого інтервалу можливої варіації пошкоджуваності, що було розраховано теоретично. На графіку додатково нанесено отримані експериментально реалізації процесів накопичення пошкоджуваності (чорні криві). Порівняння експериментальних та розрахункових даних по довірчому інтервалу для пошкоджуваності, який може бути отриманий для даного матеріалу вказує їх якісну узгодженість між собою.

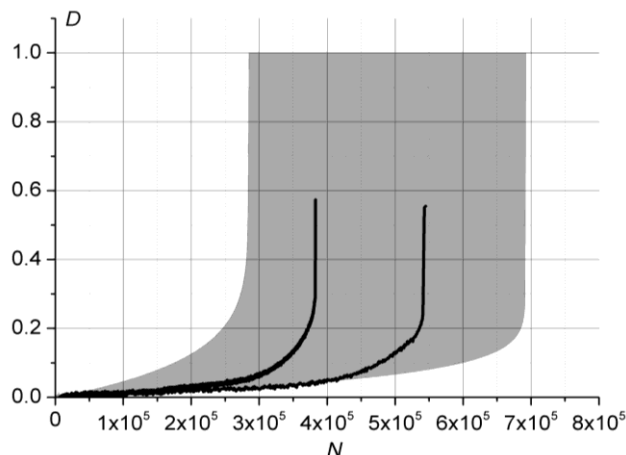
Безпосереднім інтегруванням щільності ймовірності пошкоджуваності в межах припустимих значень розраховується ймовірність безвідмовної роботи  $P$  (функція надійності). Даний параметр може бути визначений як ймовірність того, що пошкоджуваність в даний момент часу є меншою за критичне значення:

$$P(t) = \Pr[D \in (0,1)] = \int_0^1 f_D(D,t) dD = 1 - Q(t),$$

$$q(t) = \frac{dQ}{dt} = -\frac{dP}{dt} \quad (19)$$



а)



б)

Рисунок 2 – Довірчий інтервал для процесу накопичення пошкоджуваності гумових зразків при деформуванні із фіксованою амплітудою (а) – 75%, б) – 66 %)

На рис. 3 представлено довірчі інтервали пошкоджуваності, які розраховані для різних рівнів амплітуд та накладені на них залежності графіків імовірностей безвідмовної роботи (ІБР). На рис. 4 представлено щільність ймовірності ресурсу  $q$  (для наочності додано графік середньої пошкоджуваності). Аналіз приведенного результату вказує на асиметрію розподілу ресурсу. Такий результат узгоджується з відомими даними в науково-технічній літературі, які вказують на те, що ресурс по втомі найкраще апроксимується лог-нормальним законом або законом Вейбула.

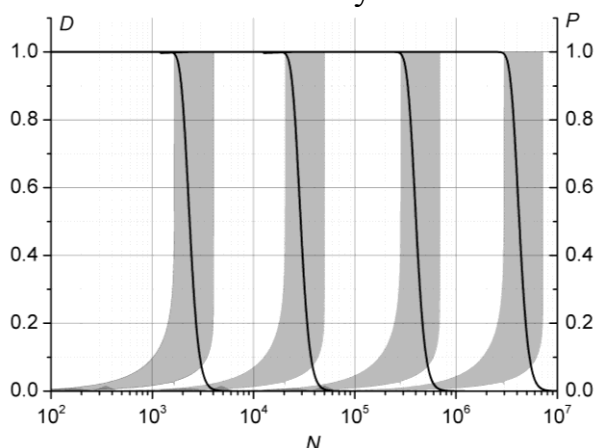


Рисунок 3 – Довірчий інтервал пошкоджуваності та ІБР зразків при амплітудах деформацій у 50%, 66%, 75%, 100% (зправа наліво)

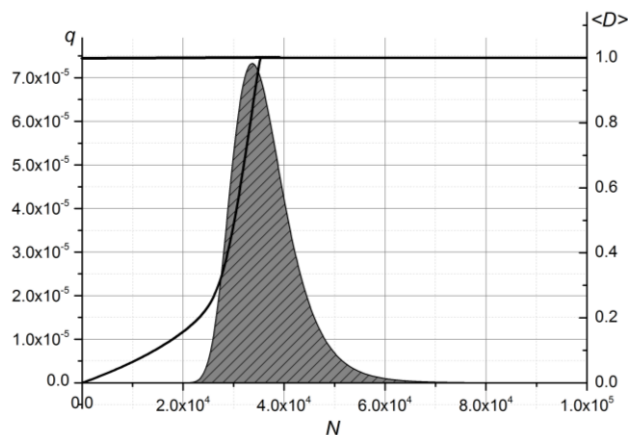


Рисунок 4 – Середня пошкоджуваність та щільність ймовірності відмови гумового зразку 2-го матеріалу

Приведені вище теоретичні основи визначення ймовірнісних характеристик процесу накопичення пошкоджуваності та статистичних показників ресурсу зразку матеріалу імплементовано в сучасні програмні комплекси інженерних розрахунків. Для кожного СЕ в певний умовний момент часу отримати середню пошкоджуваність та статистичні показники ресурсу. На рис. 5 показано отри-

мані в рамках СЕ моделювання із застосуванням розробленого математичного апарату, просторові розподіли ймовірності відмови  $Q$  для моделі експериментального зразку гуми, що умовно деформується циклічно із амплітудою, яка відповідає його статичному НДС.

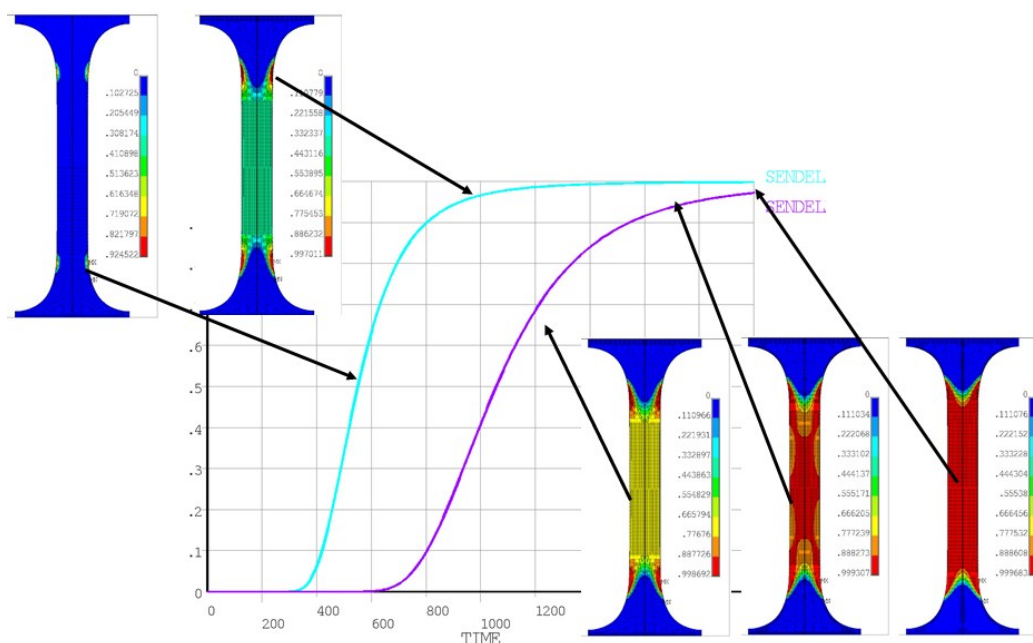


Рисунок 5 – Просторові розподіли ймовірності відмови  $Q$  для моделі експериментального зразку

Запропоновано теоретичний метод для ймовірнісної оцінки кінетики росту пошкоджуваності втоми в гумових матеріалах з урахуванням старіння. Посилаючись на відомі дані в літературі, а також на власні експериментальні дослідження, вводиться припущення, що вплив процесу старіння на втомну міцність проявляється у зменшенні кількості циклів, що витримує матеріал до відмови за тих самих умов навантаження. Таке припущення було перевірено експериментальними оцінками на зразках гумових матеріалів, що зазнали прискореного штучного старіння<sup>3</sup>.

В якості феноменологічної моделі для опису поступової зміни у часі характеристик міцності використовується гіперболічна від часу залежність

$$N_0 = \frac{N_{00}}{(1 + \gamma \cdot t)} \quad (20)$$

де  $N_{00}$  – кількість циклів до відмови на фіксованому рівні навантаження для матеріалу, що не зазнав старіння;  $\gamma$  – коефіцієнти зменшення кількості (швидкість зміни) циклів до відмови внаслідок старіння. Дані параметри вважаються статистично незалежними нормальними випадковими величинами, що дозволяє врахувати існуючий розкид експериментальних даних по визначенню кількості циклів до відмови та збереженість цього розкиду з часом.

<sup>3</sup> Схожий підхід, щодо врахування деградації матеріалу, який знаходиться в тривалій експлуатації, на характеристики надійності, як зменшення границі витривалості матеріалу за лінійним законом у часі було запропоновано в роботі: Жовдак В. А. Прогнозирование надежности механических систем / В. А. Жовдак, Л. Ф. Тарасова. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2007. – 108 с.

Для дослідження впливу старіння на процес накопичення втоми розглядається рівняння (7) з урахуванням параметрів (11) серед яких базова кількість циклів до відмови є випадковим процесом, що описує деградацію властивостей матеріалу внаслідок старіння відповідно до (20)

$$\frac{dD}{dt} = \frac{\omega_e}{N_0(t) \cdot (m+1) \cdot S_{eq}^m} \left( \frac{S_{eq}}{1-D} \right)^m = \frac{\omega_e \cdot (1+\gamma \cdot t)}{N_{00} (m+1) S_{eq}^m} \left( \frac{S_{eq}}{1-D} \right)^m. \quad (21)$$

Рішення (21) знаходиться введенням заміни (12), яка зводить (21) до лінійного диференційного рівняння відносно нової випадкової функції  $U(t)$ :

$$\frac{dU}{dt} = \psi \cdot \chi^{-1} (1+\gamma \cdot t), \quad N_{00} = \langle N_0 \rangle \chi. \quad (22)$$

Імовірнісні характеристики цього рівняння знаходяться безпосереднім усередненням, з урахуванням того, що випадкові параметри  $\chi$  та  $\gamma$  є незалежними величинами із відомими статистичними характеристиками:

$$\langle U(t) \rangle = k_1 \cdot \left( t + \frac{\langle \gamma \rangle \cdot t^2}{2} \right), \quad (23)$$

$$\sigma_U^2(t) = k_2^2 \cdot \left( 1 + \langle \gamma \rangle t + \frac{\sigma_\gamma^2 + \langle \gamma \rangle^2}{4} t^2 \right) \cdot t^2 = k_2^2 \cdot \left( \left( 1 + \frac{\langle \gamma \rangle t}{2} \right)^2 + \frac{\sigma_\gamma^2}{4} t^2 \right) \cdot t^2. \quad (24)$$

Таким чином, підставлення (23) та (24) у (16) дає можливість визначити одновимірну щільність ймовірності пошкоджуваності  $D(t)$  як нестационарного процесу з урахуванням наявності випадкового розкиду характеристик опору втомі матеріалу та стохастичного процесу старіння матеріалу, який проявляється у деградації характеристик міцності. Інтегрування цієї щільності ймовірності по області допустимих значень дає ймовірнісні характеристики ресурсу.

На рис. 6 представлено отримані характеристики надійності для тестових розрахунків для гумового матеріалу, що розраховані з та без врахування процесу старіння, а також окремо для матеріалу із характеристиками опору втомі після їх дворічного старіння. Аналіз наведених даних вказує, що ресурс для матеріалу без врахування старіння є завищеним у 7 разів.

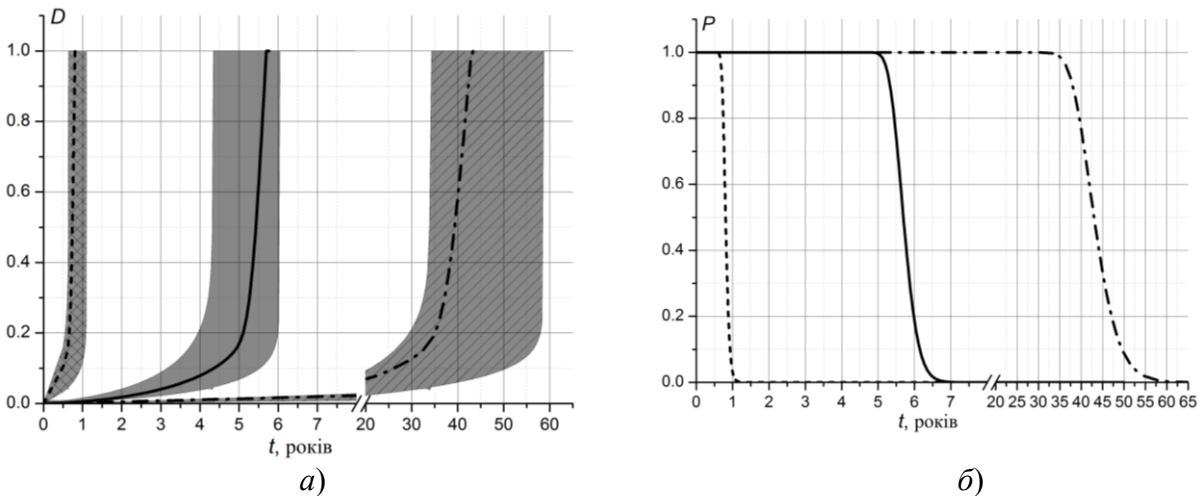


Рисунок 6 – Вплив поступового процесу старіння на накопичення пошкоджуваності втоми (а) та ймовірність безвідмовної роботи (б) в гумових матеріалах при тривалому деформуванні з постійними амплітудами

У **четвертому розділі** наведено результати експериментальних досліджень характеристик пружності, статичної міцності та опору втомі гумових матеріалів. Дані дослідження проводились на сучасному обладнанні в лабораторії кафедри механіки суцільного середовища Аахенського технічного університету (м. Аахен, Німеччина) та в лабораторії інституту композиційних матеріалів Ризького технічного університету (м. Рига, Латвія).

Для досліджень використано зразки, гуми геометрія яких відповідає вимогам стандартів щодо механічних випробувань гумоподібних матеріалів ISO 527 1BA (рис. 7). Експерименти проводились для оцінки статичної міцності, визначення характеристик нелінійної пружності та показників втомної міцності. Кожен експеримент проводився щонайменше 5 разів для отримання статистичних показників, а також для перевірки на повторюваність результатів.

Результати експериментів показали, що граничні рівні деформацій для цих матеріалів відповідно становлять 610%, 285% та 810%, а граничні напруження Піола-Кірхгофа 20 МПа, 11 МПа та 9.5МПа. Квaziстатичні експериментальні випробування надали можливість провести оцінки пружних характеристик даних матеріалів, які використані у подальшій теоретичній оцінці ресурсу та загального деформування в роботі гумо-кордних компенсаторних муфт та пневматичних шин при вирішенні практичних задач.

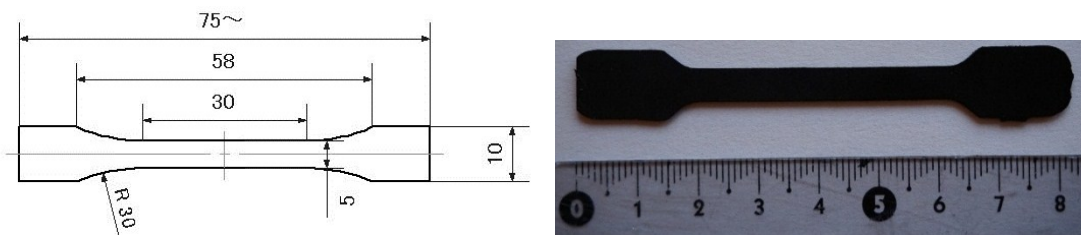


Рисунок 7 – Геометрія зразків для випробувань (відповідно до ISO 527 1BA)

В даному розділі також наведено результати експериментальних оцінок втомної міцності для перших двох матеріалів. Під час проведення тестів обладнання дозволяло автоматично фіксувати в реальному часі характеристики, що вимірювались. Із зареєстрованих даних було отримано залежність напружень Піола-Кірхгофа від кількості циклів, що витримав зразок. Аналіз отриманих залежностей вказує на те, що напруження в зразках поступово спадає із ростом числа циклів деформації. Така ситуація пояснюється накопиченням втомної пошкоджуваності в матеріалі – утворення мікродефектів та мікротріщин, які його послаблюють, що за фіксованого рівня деформацій призводить до зменшення вимірюваного зусилля. Виникнення та розвиток великої кількості поверхневих дефектів на гумовому зразку в процесі його циклічного деформування підтверджувалось візуально. На рис. 8 представлено фотографії, які отримані із застосуванням фотокамери, що має високу роздільну здатність.

Відношення початкового значення напружень до зареєстрованого процесу зменшення напружень в експерименті надають можливість отримати експериментальні криві реалізації процесу накопичення пошкоджуваності при циклічному деформуванні зразку. На рис. 2 представлені отримані експериментально реалізації процесів накопичення пошкоджуваності (чорні криві), які було ви-

значено з експериментів. Наведені результати показують, що експериментальні криві якісно повторюють теоретичні дослідження та знаходяться у теоретично визначеному довірчому інтервалі з  $\beta = 0,99$ . Слід відзначити, що більш вираженим цей процес є при невеликих рівнях амплітуд деформації.

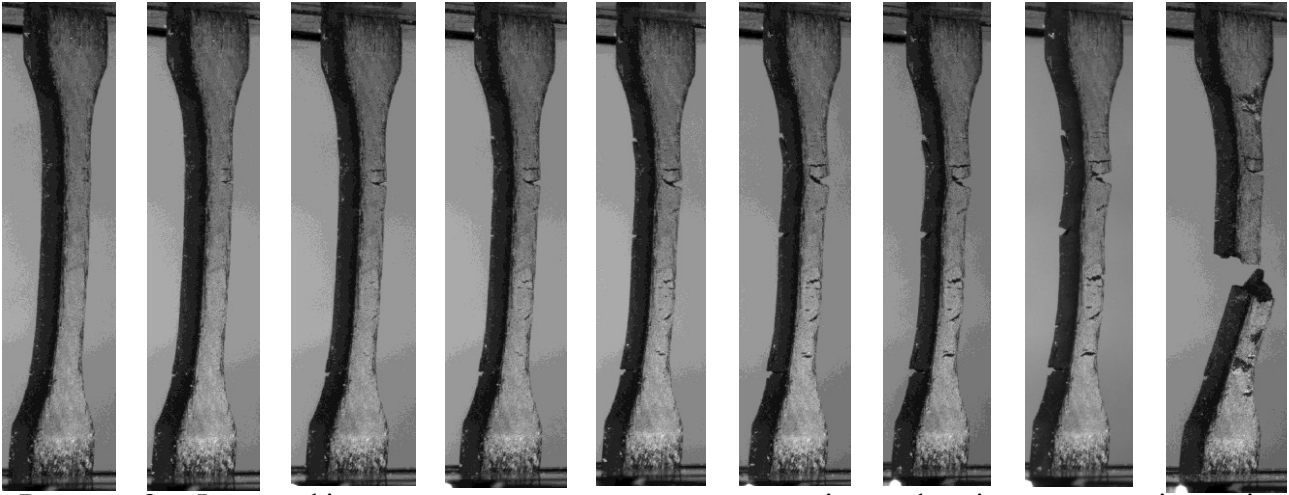


Рисунок 8 – Фотографії процесу зародження та розвитку мікродфектів на поверхні зразків під час їх циклічного деформування

Досліджено вплив процесів старіння на характеристики пружності, статичної міцності та опору втоми для тих самих матеріалів. Для прискореного штучного старіння використовувалось витримка при температурі 80 °С. Еквівалентні значення по часу зберігання (експлуатації) матеріалів в звичайних умовах було визначено з моделі Арреніуса. При цьому встановлено, що витримку зразків 3 та 6 діб у термо-камері на температурі 80 °С, що відповідає перебуванню цього матеріалу в нормальних умовах протягом 1 та 2 років.

Відзначено, що старіння суттєво зменшує максимальні можливі деформації в матеріалах. Так, граничні деформації на розрив внаслідок старіння зменшуються на (20-30)% за перший рік та на (40-55)% за другий. Крім того, спостерігається набуття гумовим матеріалом більшої жорсткості (підвищення початкових модулів пружності у 1.5 рази).

Представлено результати експериментальних досліджень щодо впливу процесів штучного старіння на характеристики втоми. На рис. 9 наведено криві втоми для матеріалів, що досліджувались до та після старіння. Порівняльний аналіз показує суттєве зменшення кількості циклів до відмови на тих самих рівнях амплітуд деформацій зразків. Так, для 1-го матеріалу базове число циклів до відмови на фіксованому рівні амплітуд деформацій у 50 % зменшилось у 80 разів. Разом із тим слід відміти, що показник нахилу кривої втоми майже не знає зміни, що надає експериментального підтвердження припущенню зробленому в третьому розділі в наведених теоретичних викладах. В таблиці 2 представлено дані по характеристикам кривих втоми до та після старіння.

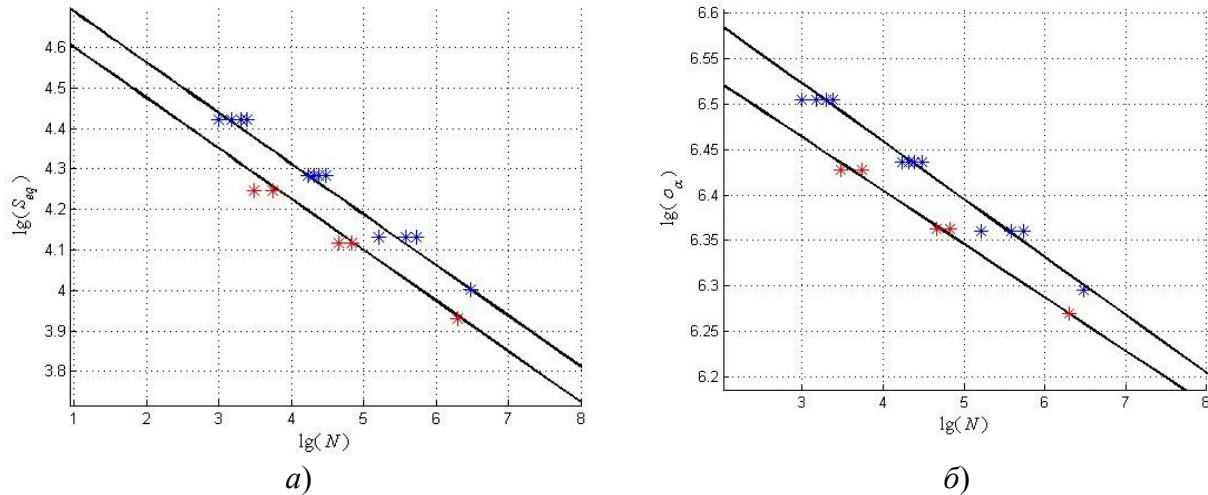


Рисунок 9 – Криві втоми гумових зразків для двох матеріалів, що досліджуються (верхні криві та сині точки) та після штучного старіння (6 днів в термо-камері на температурі 80 °С)

Таблиця 2 – Характеристик кривих втоми до та після старіння

матеріал	параметри кривої втоми							
	1й матеріал				2й матеріал			
	$m$	$S_c$ , Па	$N_0$	$\lg(N_0)$	$m$	$S_c$ , Па	$N_0$	$\lg(N_0)$
у первісному стані	8	$6.4 \cdot 10^3$	$1,1 \cdot 10^8$	8,05	4	$1,16 \cdot 10^4$	$8,5 \cdot 10^5$	5,93
після штучного старіння 6 днів в термо-камері з температурою 80 °С	при фіксованому рівні базових амплітуд деформацій							
	8	$8.5 \cdot 10^3$	$2,0 \cdot 10^6$	6,32	4	$5,88 \cdot 10^4$	240	2,38
	при фіксованому рівні базових амплітуд еквівалентних напружень							
	8	$6.4 \cdot 10^3$	$1.9 \cdot 10^7$	7.28	4	$1,16 \cdot 10^4$	$1,6 \cdot 10^5$	5.2

**П'ятий розділ** присвячено експериментальним дослідженням та теоретичному моделюванню характеристик пружності, статичної міцності та опору втомі гумо-кордних композитів. Розглядається композит, що складається з гумової матриці (1й матеріал) та має односпрямоване посилення текстильним кордом. Експериментально визначено параметри міцності та пружності для даного композиту в трьох напрямках (вздовж та впоперек армування, а також в напрямку перпендикулярному до площі армування).

Під час поступового статичного навантаження зразків композиту вздовж напрямку армування спостерігається лінійний відгук системи в межах 15% деформацій після якого відбувається пошкодження волокон корду. Остаточний розрив зразку спостерігається на рівнях деформацій 250-300%, які значно менші за граничні деформації чистих гумових зразків 570-630%. Поведінка композиту в напрямку ортогональному до армування якісно повторює поведінку чисто гумового матеріалу, але остаточний розрив зразку спостерігається на рівнях деформацій 200-250%. Аналогічні висновки можна зробити і щодо граничних напружень на розрив. Така ситуація пояснюється наявністю високої внутрішньої концентрації напружень та деформацій в місцях де є корд, внаслідок порушення ним однорідності структури матеріалу. Квазістатичні випробування

надали можливість визначити пружні характеристики даних матеріалів в трьох головних напрямках.

Для вирішення практичних задач отриманих експериментально даних є недостатньо (завдання ортотропних характеристик матеріалу потребує 9-ти констант). З метою довизначення необхідних даних проведено чисельні розрахунки. Для цього було побудовано SE модель презентативного об'єму даного композиту, яка явним чином враховує наявність кордного елементу (рис. 10).

Використовуючи таку модель проведено серію розрахунків, в яких задавалось жорстке навантаження таким чином, аби отримати простий деформований стан: одновісного розтягу або простого зсуву. Внаслідок наявності корду, що має значно більш жорсткі характеристики матеріалу, напружений стан, що виникає при такому деформуванні є неоднорідним. Проводячи процедуру усереднення характеристик НДС по всьому об'єму представницького елементу композиту отримано систему рівнянь для визначення потрібних констант: 3-х модулів пружності, 3-х коефіцієнтів Пуасона та 3-х модулів зсуву.

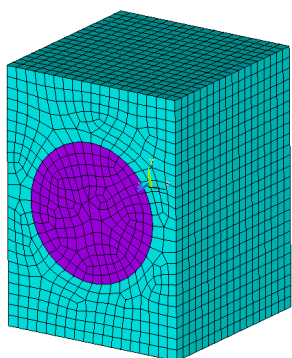


Рисунок 10 – Презентативний об'єм композиту

Для даного композиту визначено характеристики опору втомі на основі додаткових експериментальних випробувань. Проведено серію експериментів на циклічне деформування зразків композиту при жорсткому навантаженні у напрямку перпендикулярному до армування. Результати апроксимовано кривою Велера. Отримано наступні параметри:  $m_\epsilon = 8$ ,  $N_{0\epsilon} = 5.3 \cdot 10^6$  для залежності амплітуд деформацій та:  $m_\sigma = 18$ ,  $N_{0\sigma} = 5 \cdot 10^6$  для залежності амплітуд напружень Коші від кількості циклів до руйнування. Значення параметру  $m$  округлено до цілого числа.

Слід відзначити, що проведені тести засвідчують, що для кожного фіксованого рівня навантаження кількість циклів до відмови, що фіксувалась під час експериментів має досить істотний розкид в межах 30% від значення, що отримане апроксимацією.

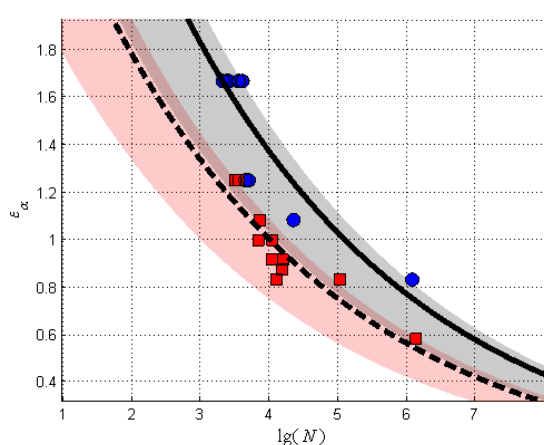


Рисунок 11 – Порівняння кривих втоми для зразків гумового композиту до та після їх штучного старіння

Проведено експериментальні випробування для даного композиту після штучного старіння (витримки при фіксованій підвищеній температурі ( $80^\circ\text{C}$ ) протягом 10 діб), що відповідає перебуванню цього матеріалу в нормальних умовах зберігання протягом 3 років. На рис. 11 наведено криві втоми зразків гумового композиту, що посилені текстильним кордом із навантаженням в напрямку перпендикулярному армуванню до та після їх штучного старіння. Суцільні криві та сині точки відповідають даним отриманим для зразків до старіння, а пунктирні криві та

червоні точки (квадратні маркери) відповідно – кривим втоми після штучного старіння зразків. Зафарбованими зонами показано розкид експериментальних значень з коефіцієнтом варіації 0.3. Порівняння кривих втоми побудованих для зразків композиту що досліджується показує, що показник нахилу кривої втоми не зазнає вираженої зміни і може вважатись сталим. Разом із тим спостерігається суттєве зменшення кількості циклів до відмови, яке може витримати даний матеріал після старіння. Так, базове число циклів до відмови на фіксованому рівні амплітуд деформацій у 50 % зменшилось у 12 раз, а аналогічне зменшення по кривим, що побудовані для істинних напружень спостерігається у 16 разів.

**Шостий розділ** присвячено побудові математичних моделей роботи пневматичних шин, що дозволятимуть визначати їх НДС, експлуатаційні характеристики та оцінювати надійність.

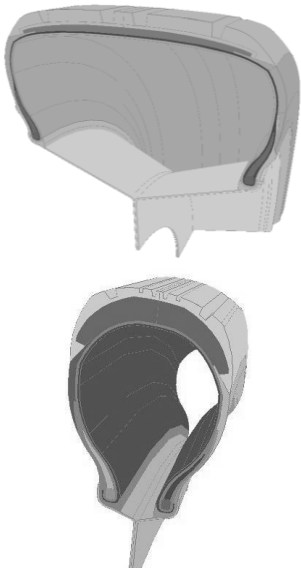


Рисунок 12 – 3D моделі автомобільної (а) та велосипедної (б) шин

Запропонована параметризація геометричної моделі пневматичних шин та алгоритм її автоматизованої побудови. Приклади побудованих моделей представлені на рис. 12. Побудовані моделі враховують багат шарову структуру шини. Крім того, каркас та брекер шини утворюють гумо-кордний композит, що має ортотропні властивості, які мають бути задані у криволінійних координатах, оскільки армування шини повторює її геометрію. Введено умовне розділення геометрії відповідних шарів шини на ділянки, які з достатньою точністю у перерізі представляють собою кола та сформовано набір фінітно-тороїдальних систем координат, у яких напрямки осей повторюють геометрію відповідних шарів.

Вказаний підхід до параметричного моделювання застосований для створення програмного продукту, який представляє собою інформаційну систему (ІС) САПР пневматичних шин. Запропонована ІС є інтегрованим спеціалізованим програмним комплексом, що використовує сучасну САД систему (перевірка параметрів) та САЕ систему (проведення необхідних розрахунків).

Представлено результати чисельних досліджень щодо формування характеристик НДС в шині за різного типу експлуатаційного навантаження, а також щодо визначення її певних функціональних характеристик. Розглянуто вертикальне змінне навантаження, яке є основним в роботі шини та визначає її радіальну жорсткість (рис. 14), а також ступінь взаємодії шини з дорожньою основою, яка визначається особливостями формування плями контакту та розподілом контактного тиску. Окремо проведено дослідження впливу величини внутрішнього тиску в шині на особливості її деформування в контакт з дорогою.

Аналогічні дослідження було проведено з моделюванням деформації шини при її зсуві окремо в напрямку кочення колеса (режим буксування) та перпендикулярно йому (увід) – рис. 13.

Узагальнений аналіз серії розрахунків дозволив отримати навантажувальні характеристики шини, тобто залежності між переміщеннями в контрольних то-

чках, що виникають при деформуванні шини та підсумованими реакціями опори при різних значеннях внутрішнього тиску. Фактично було визначено інтегральні жорсткісні характеристики шини, які є одними з основних її експлуатаційних показників рис. 15.

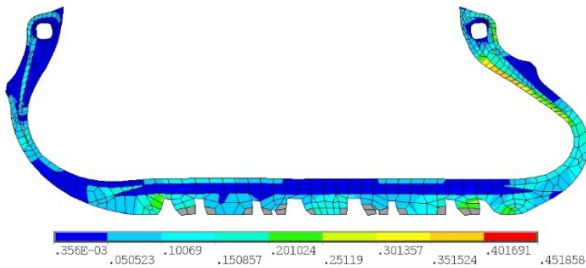
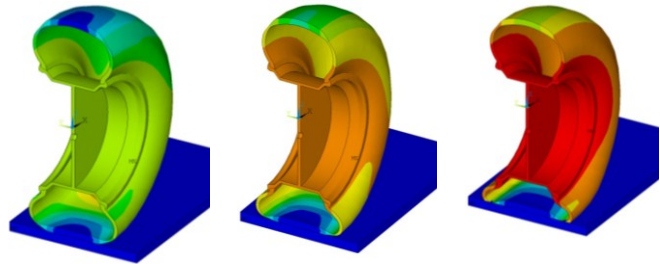
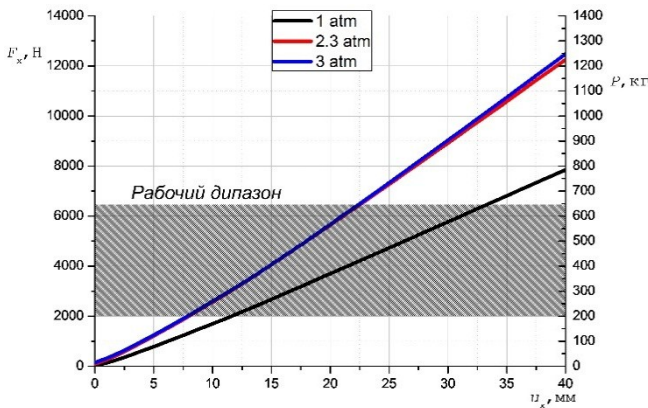


Рисунок 13 – Розподіл головних деформацій при бічному зсуві шини

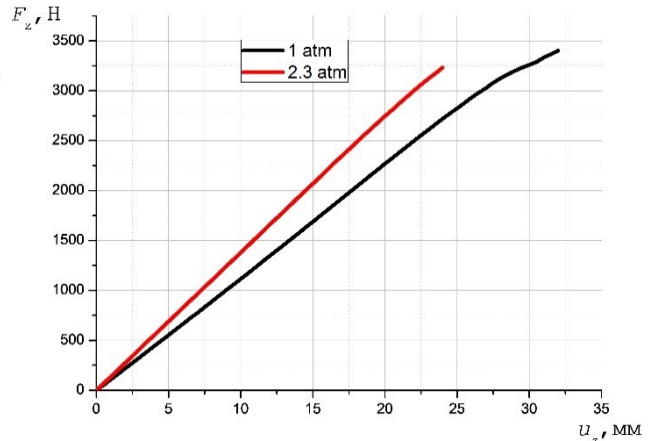


$G=2.5$  кН       $G=4.3$  кН       $G=6.25$  кН  
Рисунок 14 – Розподіл сумарних переміщень при різному вертикальному навантаженні



вертикальне навантаження

Рисунок 15 – Навантажувальні характеристик пневматичної шини



додаткове поперечне навантаження на зсув

Використовуючи методологію багатомасштабного субмоделювання отримано уточнені оцінки по характеристикам НДС шини в найбільш небезпечних зонах. Відповідно до підходу задача розв'язується у декілька етапів. На першому – проводиться розрахунок повної моделі з досить грубою SE сіткою, яка не дає достовірної картини НДС, але є достатньою для отримання якісної картини деформування (результати цих досліджень представлені на рис. 13-15).

На другому етапі в якості субмоделі був виділений сегмент у 45 градусів з повної моделі шини, яка була розрахована на попередньому етапі. Для цієї моделі створена нова значно подрібнена сітка (кількість SE елементів сегменту дорівнює кількості SE всієї шини). В якості граничних умов субмоделі використані ті ж граничні умови, що й в повній моделі та додатково на границях сектору прикладені переміщення, отримані в цих вузлах при розрахунку повної моделі для імітації дії відкинутої частини.

На третьому етапі субмоделювання з 45-градусного сегменту виділяються дві ще менші – 15-градусні сегменти. Відповідно розмірність SE сітки кожного з 15-градусних сегментів дорівнює розмірності 45-градусного.

Аналіз отриманих даних по НДС елементів шини дозволяє визначити, що найбільш навантаженими є каркас та брекер, у яких можна виділити чотири зо-

ни найбільших деформацій: плечову (каркас та брекер), біля борту (каркас) та в місці здвоєння каркасу на бічній частині шини.

Використання серії розрахунків для різних точок по колу шини дозволили отримати апроксимації циклів зміни НДС найбільш навантажених зон композитних шарів, що формуються під час кочення колеса. Найбільші напруження виникають в гумовій матриці навколо корду. На рис. 16 представлені цикли зміни даних напружень у навантажених зонах (результати наведені у полярних координатах). Узагальнення результатів показує, що найбільш навантаженою областю є плечова зона, яка має два сплески напружень за один оберт колеса.

Далі в розділі отримані цикли по напруженням використовуються для прогнозування надійності шини. Враховується процес старіння гумової матриці. Крім цього, додатково розглядається питання впливу випадкової варіації характеристик навантаження. При цьому вважається, що амплітуди цього циклу навантаження мають малу експлуатаційну варіацію та в-першу чергу формуються основним циклом, який пов'язаний з деформацією шини при вході в контакт. Проте частота циклу залежить від швидкості руху транспортного засобу, і як наслідок не може бути чітко задана так як носить випадковий характер. Зроблено припущення, що швидкість руху транспортного засобу є стаціонарним випадковим процесом, тобто імовірнісні характеристики цього процесу не залежать від відліку часу (від початку спостереження за цим процесом).

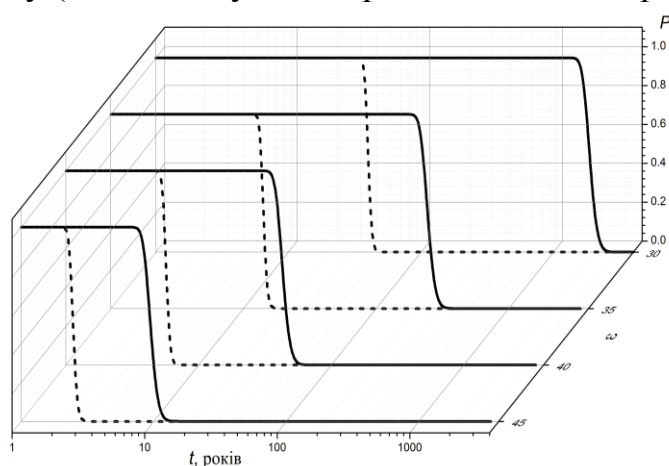


Рисунок 17 – Імовірності безвідмовної роботи пневматичних шин при різних амплітудах деформацій з врахуванням поступового старіння та без нього

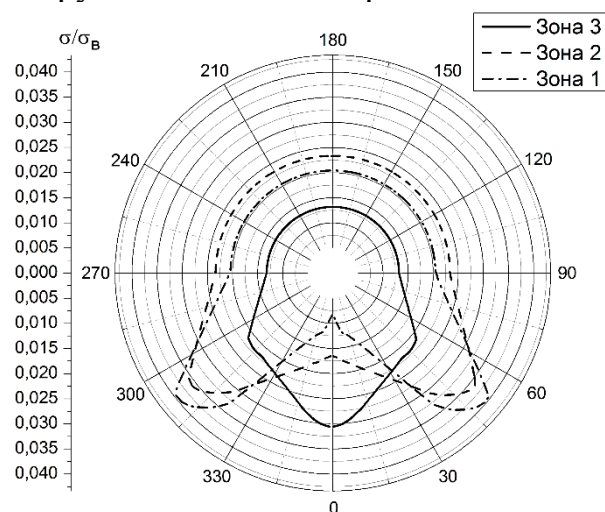


Рисунок 16 – Цикл напруженого стану гумової матриці шини в місцях концентрації

Імовірнісні характеристики такого процесу оцінено з відомих статистичних даних щодо зміни швидкості руху легкового транспортного засобу, що здійснює рух в міському циклі. Отримані характеристики процесу накопичення пошкоджуваності та оцінено ймовірність безвідмовної роботи (ІБР) в шині для різних варіантів завантаженості. Додатково показано результати, які не враховують процес старіння (рис. 17).

В цьому розділі представлено результати вирішення задачі прогнозування надійності гумо-кордних високонапірних муфт трубопроводів та амортизаційних багатошарових прокладок.

Аналіз експлуатаційної надійності елементів машин необхідно проводити з урахуванням того, що реальні умови експлуатації не відбуваються з фіксованим рівнем навантаження, а завжди існує певний їх розкид. Таким чином, типowo в експлуатації НДС має певний середній рівень навколо якого формується випадкова пульсація. В розділі представлено розвиток розглянутого раніше розрахункового методу визначення показників надійності та ресурсу елементів конструкцій на цей випадок. Дослідження обмежується припущенням того, що НДС є стаціонарним вузкополосним випадковим процесом. Такий процес матиме фіксований детермінований рівень середніх напружень  $S_{eqm}$ , та випадкову амплітуду  $S_{eq}(t)$ , яка змінюється відповідно до закону Релея та має експоненційну кореляційну функцію. Кінетичне рівняння накопичення пошкоджуваності втомі з урахуванням наявності зазначеної варіації характеристик НДС, а також стохастичного процесу деградації параметрів опору втомі матеріалу внаслідок старіння представляється у вигляді

$$\frac{dD}{dt} = \frac{\omega_e}{N_0 \cdot (m+1) \cdot S_{eq}^m} \left( \frac{S_{eq}(t)}{1-D} \right)^m. \quad (25)$$

Рішення (25) знаходиться введенням заміни (12), яка зводить проблему до лінійного диференційного рівняння відносно нової випадкової функції  $U(t)$

$$\frac{dU}{dt} = \psi \cdot \xi^m(t) \chi^{-1} (1 + \gamma), \quad (26)$$

де випадкову складову у кривій Велера задано за допомогою нормованого випадкового коефіцієнта  $\chi$  відповідно до другого виразу (21), а також введено нормування для процесу випадкової зміни амплітуд еквівалентних напружень

$$S_{eq}(t) = \langle S_{eq} \rangle \xi(t). \quad (27)$$

Рівняння (26) має квадратурне представлення, що дає можливість визначити аналітичний вираз для математичного очікування та дисперсії  $U(t)$ :

$$\langle U \rangle = \psi \cdot k_0 \langle \chi^{-1} \rangle \left( t + \frac{\langle \gamma \rangle t^2}{2} \right), \quad \sigma_U^2(t) = \beta_4 t^4 + \beta_3 t^3 + \beta_2 t^2 + \beta_1 t, \quad (28)$$

де коефіцієнти  $\beta_i$  та  $k_0$  є сталими параметрами, що визначаються наступними аналітичними виразами:

$$\beta_1 = \psi^2 \langle \chi^{-2} \rangle \frac{2k_3^2}{\alpha} \left( 1 - \frac{\langle \gamma \rangle}{\alpha} \right), \quad \beta_2 = \psi^2 \langle \chi^{-2} \rangle \left( k_0^2 + \frac{2k_3^2}{\alpha} \langle \gamma \rangle - \frac{k_3^2}{\alpha^2} \langle \gamma^2 \rangle \right), \quad (29)$$

$$\beta_3 = \psi^2 \langle \chi^{-2} \rangle \langle \gamma \rangle k_0^2, \quad \beta_4 = \psi^2 \langle \chi^{-2} \rangle \langle \gamma^2 \rangle \frac{k_0^2}{4}, \quad (30)$$

$$k_0 = \langle \xi^m \rangle = \int_0^\infty \xi^m \cdot f_\xi(\xi) d\xi = \int_0^\infty \frac{\xi^{m+1}}{\sigma_\xi^2} \exp\left(-\frac{\xi^2}{2\sigma_\xi^2}\right) d\xi = \sigma_\xi^m 2^{\frac{m}{2}} \Gamma\left(\frac{m}{2} + 1\right), \quad (31)$$

$$k_3 = \int_0^{\infty} \xi_1^m \cdot f_{\xi}(\xi_1) \left( 1 - \frac{\xi_2^m}{2\sigma_{\xi}^2} \right) d\xi_1 = \sigma_{\xi}^m 2^{\frac{m}{2}} \left[ \Gamma\left(\frac{m}{2} + 1\right) - \Gamma\left(\frac{m}{2} + 2\right) \right], \quad (32)$$

де  $\Gamma(x)$  – гама-функція.

Таким чином, отримані співвідношення після підстановки у (16) надають можливість визначити одновимірну щільність ймовірності пошкоджуваності  $D(t)$ , як нестационарного процесу з урахуванням наявності випадкової варіації амплітуд напружень та стохастичного процесу старіння матеріалу, який проявляється у деградації характеристик опору втомі.

Розроблені теоретичні положення разом із виначеними експериментально параметрами матеріалів та на основі використання сформованої методології багато-масштабного моделювання елементів машинобудівних конструкцій з гумо-кордними композитами було застосовано до

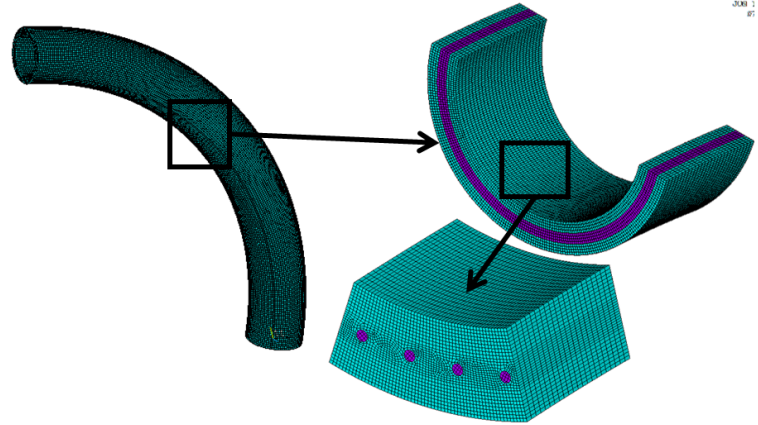


Рисунок 18 – SE моделі різних рівнів суб-моделювання тороїдальної муфти

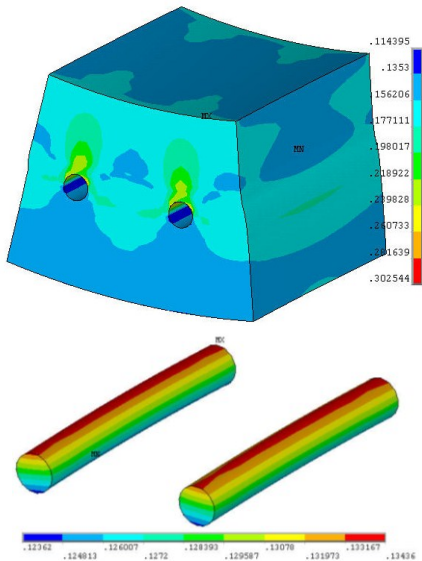


Рисунок 19 – Результати SE суб-моделювання з визначення деформацій корду (а) та гумової матриці (б) муфти

визначення характеристик НДС та прогнозу надійності криволінійних гумо-кордних шлангів (компенсаторних муфт). На рис. 18 представлено скінчено-елементні моделі для всіх рівнів суб-моделювання гумо-кордної муфти, яка армована текстильним кордом. Результати розрахунків на першому з етапів суб-моделювання показав, що максимальні деформації, що було визначено зосереджені на внутрішньому шарі труби-муфти і складають майже 16%. Максимальні еквівалентні напруження в гумових шарах спостерігаються на внутрішньому шарі (0.6 МПа).

Подальше уточнення характеристик НДС (рис. 19) показало, що існуюча концентрації НДС в місцях наявності корду призводить до того, що гумовій матриці рівень еквівалентних деформацій внаслідок внутрішньої локалізації біля елементів

корду складає 30%, що в 2 рази більше ніж максимальна деформація, яка була встановлена в цій конструкції при попередньому дослідженні.

Аналізуючи можливі значення напружень та деформацій в компенсаторній муфті, слід наголосити, що реальні умови експлуатації мають варіацію характеристик навантаження. Таким чином, в даній роботі пропонується вважати, що НДС має середній рівень, що відповідає отриманим з розрахунків значенням,

але навколо нього існує випадкова пульсація з амплітудою, що має 30% варіацію.

На рис. 20 представлено результати розрахунків параметрів надійності конструкції. Імовірність безвідмовної роботи муфти, як функція часу, а також пунктирною кривою середню пошкодженість. В роботі, зокрема, проаналізовано вплив параметру  $\gamma$ , який характеризує швидкість процесу старіння. Параметр варіювався в широкому діапазоні значень від 0 до  $32 \text{ рік}^{-1}$ . Нульове значення відповідає оцінці втомі без врахування процесу старіння, в той час якщо  $\gamma = 32 \text{ рік}^{-1}$ , то це означає, що кількість циклів до відмови за 3 місяця на фіксованому рівні деформацій зменшилась на порядок (у 10 разів). Існуючі експериментальні дані по гумі, що має близькі до даного матеріалу властивості, показали, що  $\gamma = 2 \text{ рік}^{-1}$ . Гарантований ресурс муфти при цьому складає 6,5, а середній майже 10 років.

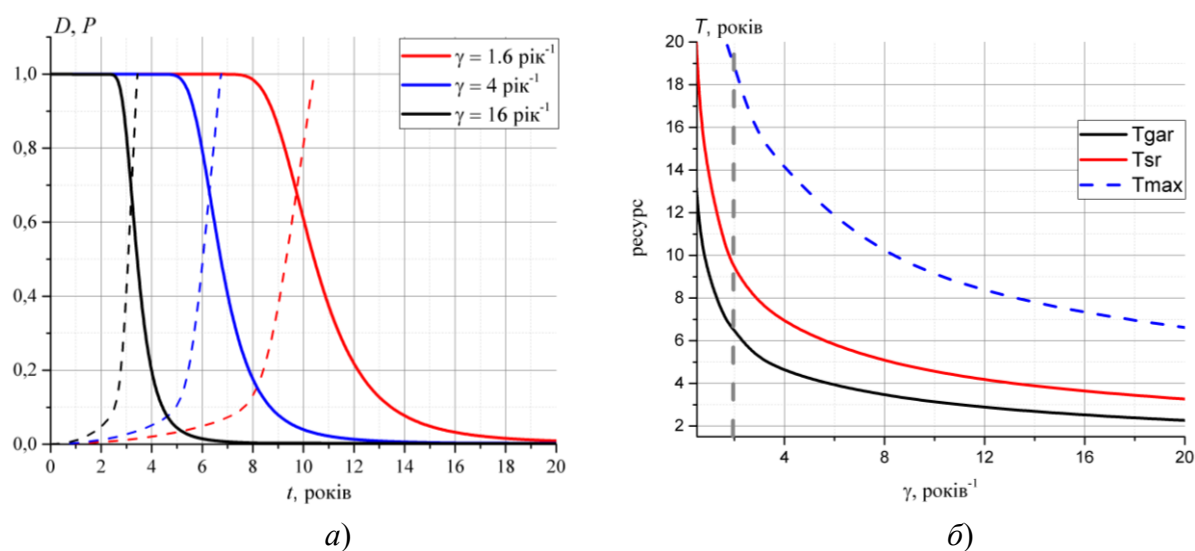


Рисунок 20 – Імовірність безвідмовної роботи (а) та ресурс (б) муфти в залежності від швидкості старіння матеріалу

В даному розділі наведено результати визначення характеристик амортизаційної гумо-кордної прокладки та вирішення задачі раціонального проектування її внутрішньої композиційної будови. Досліджується багатошаровий амортизаційний елемент, що складається з гуми та має шари посилені текстильним армуванням. На рис. 21 представлено фотографію, ескізне креслення даного елемента, СЕ модель. Проведено дослідження щодо формування НДС в гумо-кордному композиті при дії зовнішнього статичного та імпульсного навантаження. Розглядалась тривимірна конструкція, що складалась з трьох елементів: верхнє жорстке тіло, гумо-кордна амортизаційна прокладка, нижнє тіло – жорстка основа. При моделюванні використано умови симетрії. Основа жорстко зафіксована по всім ступеням вільності, протилежне тіло обмежене до можливості відтворювати лише вертикальні рухи. Навантаження прикладалось на «верхнє» тіло як рівномірно розповсюджений тиск в 10 МПа.

Сама багатошарова прокладка моделюється як система жорстко з'єднаних об'ємів кожен з яких має власну товщину та може мати власні властивості ма-

теріалу. Ідея вибору оптимальної внутрішньої будови прокладки полягає в можливості зміни цих параметрів. Для завдання певним прошаркам кордного посилення використовувався спеціальний СЕ, який вбудовується у вже існуючий і відповідно до своїх характеристик (жорсткість волокон та їх просторова орієнтація) та додає в матрицю жорсткості СЕ додаткову мембранну жорсткість.

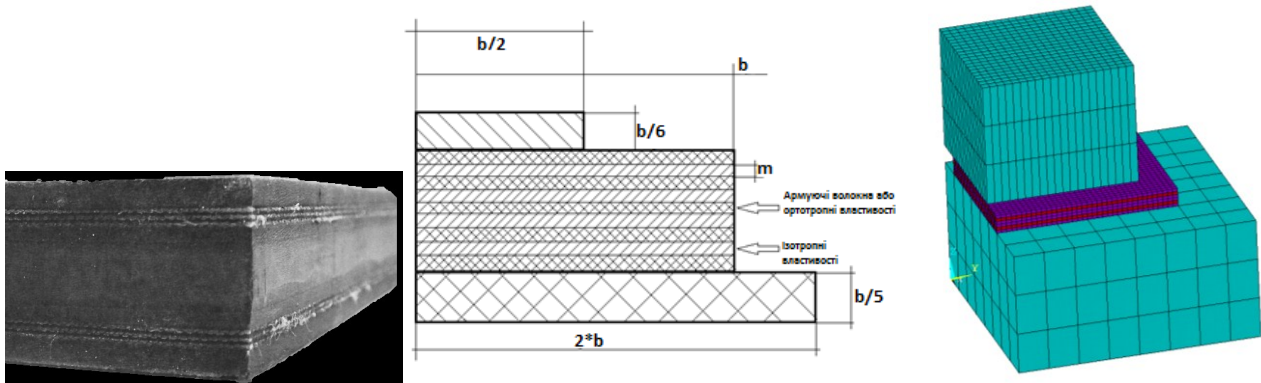


Рисунок 21 – Схематичне подання, фотографії та СЕ модель гумової композитної амортизаційної прокладки

За розглянутими вище принципом параметризації було створено систему макросів (скриптових програм), які дозволяють отримувати моделі із різною внутрішньою будовою амортизаційної прокладки, що придатні для проведення розрахунків на міцність в сучасних програмних комплексах інженерних розрахунків. Дана система використана разом із генетичним алгоритмом, що дозволило визначити покращені характеристики прокладки з точки зору забезпечення статичної міцності.

Для знайдених варіантів конструкції проведено дослідження динамічних характеристик даної амортизаційної прокладки. Аналіз віброізоляційних властивостей прокладки проводився по рівням сумарної вертикальної динамічної реакції, що виникає в основі при імпульсному збудженні рухомої частини конструкції. Порівняння амплітуд пікових значень показує, що знайдений варіант конструкції має на 15% менші значення в порівнянні до базової конструкції

## ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішено науково-прикладну проблему, яка полягає у створенні розрахункових методів оцінки надійності та визначення ресурсу машинобудівних елементів конструкцій з гумо-кордними композитами та їх складовими на основі створення ймовірнісних математичних моделей накопичення пошкоджуваності та науково обґрунтованих підходів до визначення характеристик НДС у відповідних елементах машин.

Отримані наукові та практичні результати дозволяють сформулювати такі узагальнюючі висновки:

1. Проведено аналіз сучасного стану питання щодо оцінки надійності елементів машин з гумо-кордними композитами та встановлено, що проблема прогнозування їх ресурсу при поступових відмовах в даних конструкціях є ак-

туальною і потребує подальшого розвитку, зокрема існує доцільність розвитку нелінійних ймовірнісних моделей накопичення пошкоджуваності втоми з урахування процесів старіння матеріалу.

2. Розроблено розрахунковий метод прогнозування надійності машинобудівних елементів конструкцій з гумо-кордними композитами при поступових відмовах, що викликані втомою та який дозволяє врахувати випадковий розкид характеристик матеріалу та їх стохастичну зміну в часі внаслідок впливу процесів старіння, а також можливу експлуатаційну варіацію характеристик НДС.

3. Сформульовано єдиний методологічний підхід до створення ієрархічної системи розрахункових скінчено-елементних моделей різного масштабу розгляду гумо-кордних композиційних елементів машин, таким чином аби моделі макрорівня інтегрально представляли композит, як ортотропний однорідний матеріал та надавали можливість вирішувати практичні задачі, що враховують особливості конструкції, умови експлуатації і т.п., а моделі мікрорівня дозволяли оцінити внутрішню концентрацію характеристик НДС.

4. Розроблено удосконалені моделі, які описують процес накопичення втомної пошкоджуваності в матеріалах, що вивчаються, при їх циклічному деформуванні на скінченних рівнях деформацій в рамках теорії континуальної механіки пошкоджуваності, а також враховують одночасне протікання процесів деградації характеристик матеріалу внаслідок старіння. Отримані аналітичні квадратурні вирази для визначення функції щільності ймовірності пошкоджуваності втоми, які дозволяють проводити аналіз впливу характеристик випадкової складової амплітуд НДС та інтенсивності старіння матеріалу.

5. Визначено зв'язок між характеристиками класичної кривої втоми та параметрами кінетичного рівняння накопичення втомної пошкоджуваності відповідно до запропонованої моделі, що дозволило розробити метод експериментальної ідентифікації параметрів моделі. Отримано експериментальні реалізації процесу накопичення втомної пошкоджуваності в гумових матеріалах, які якісно повторюють визначені розрахункові залежності та знаходяться в межах теоретично розрахованого довірчого інтервалу.

6. За результатами виконаної серії експериментальних досліджень по оцінці закономірностей зміни характеристик пружності, міцності та опору втомі типових гумових матеріалів після їх штучного старіння встановлено, що:

- старіння суттєво зменшує максимальні можливі деформації в матеріалах, так деформації на розрив зменшуються на (20-30)% за перший умовний рік зберігання та на (40-53)% за другий;
- матеріали, які досліджуються за загальний час штучного старіння отримали підвищення початкових модулів пружності у 1.5 рази;
- показник нахилу кривих втоми майже не зазнає зміни, проте спостерігається суттєве зменшення кількості циклів до відмови (базове число циклів до відмови зменшується на 2 порядки);

Отримані дані надають підтвердження та обґрунтування зробленим припущенням при формуванні математичних моделей, а також застосовуються при вирішенні практичних задач з оцінки надійності пневматичних шин і гумо-

кордних криволінійних шлангів та можуть бути використані для прогнозування ресурсу інших машинобудівних конструкцій.

7. Проведено експериментально-розрахункові дослідження зразками композитного матеріалу, які дозволяють оцінити його ортотропні пружні характеристики. Порівняння розрахункових результатів та експериментальних даних достатньо добре узгоджуються між собою (2-6)% в площині армування та 27% при деформуванні в напрямку перпендикулярному до площини армування.

8. За результатами узагальнення виконаних експериментальних та теоретичних досліджень по оцінці втомної міцності гумо-кордних композитів, зокрема і після їх штучного старіння, отримано, що базове число циклів до відмови зменшуються у 12-16 раз. Показник нахилу кривої втоми істотно не змінюється внаслідок старіння. Розкид експериментальних даних по кривим втоми до та після старіння спостерігається в межах 30% коефіцієнту варіації базового числа циклів до відмови.

Отримані закономірності можуть бути застосовані для широкого класу прикладних задач оскільки дозволяють отримати оцінки по залишковому ресурсу конструктивних елементів з гумо-кордними композитами і в такий спосіб спланувати ремонтні роботи, технічні огляди тощо.

9. На основі використання створеного методологічного підходу, запропоновано ряд ієрархічних систем зв'язаних СЕ моделей для дослідження характеристик НДС та оцінці надійності автомобільних пневматичних шин, багатошарових амортизаційних прокладок, гумо-кордних тороїдальних компенсаторних муфт, що враховують особливості їх тривимірної багатошарової конструкції, криволінійну ортотропію механічних властивостей, а також дозволяють визначати як функціонально-експлуатаційні характеристики, так і особливості формування НДС. При цьому:

- отримано інтегральні жорсткісні характеристики пневматичних шин в різних напрямках в рамках вирішення задачі щодо контактної взаємодії шини з твердою дорожньою основою. Визначено закономірності формування циклів зміни НДС в найбільш навантажених зонах шини, що формуються під час кочення колеса. Встановлено, що найбільш навантаженою областю є плечова зона шини, яка має складний цикл навантаження з двома сплесками напружень за один оберт колеса. Отримані цикли по напруженням застосовані для прогнозування надійності шини. Визначено, що ресурс пневматичних шин, який оцінюється для матеріалу без врахування старіння є завищеним у 7 разів, тобто за оцінками ресурсу по втомі без врахування старіння пневматичні шини можуть експлуатуватись понад 35 років, але гарантований термін експлуатації не вище 5 років оскільки матеріал втрачає можливість опиратись втомі з часом, що пришвидшує накопичення втоми;

- визначено параметри надійності роботи тороїдальної компенсаторної муфти-коліна промислових трубопроводів. При цьому встановлено, що гарантований та середній ресурс муфти-шлангу при складає 6,5 та 10 років відповідно, проаналізовано вплив швидкості процесу старіння на ресурс конструкцій;

- створено параметричну модель багатошарової амортизаційної прокла-

дки та розроблено інформаційну систему вибору раціональних параметрів її амортизації за допомогою генетичного алгоритму. Визначено, покращений варіант конструкції, що забезпечує на 30% більший запас по міцності та експлуатаційний ресурс ніж було визначено у базових тестових варіантах конструкції. Отримано, що знайдена конструкція забезпечує на 15% кращі функціональні якості прокладки при її динамічному імпульсному збудженні.

10. Результати наукових досліджень впроваджено в практику проектно-дослідних робіт провідних вітчизняних підприємств машинобудівної галузі України ПАТ «РОСАВА» (м. Біла Церква, Київська обл.), ПрАТ «ІнтерМікро Дельта, Інк» торгівельна марка «Дніпрошина» (м. Дніпро), в ПАТ «АвтоКрАЗ» (м. Кременчук), а також в навчальний процес: в НТУ «ХПІ» та у Національному транспортному університеті (м. Київ).

### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Ларин А. А. Компьютерное моделирование пневматической шины с учетом ее внутренней многослойной структуры и ортотропии механических свойств / Ю. В. Арефин, А. А. Ларин // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». — 2010. — №. 69. — С. 72–78.

*Здобувачу належить постановка задачі, розроблена плоска розрахункова модель пневматичної шини, проаналізовано особливості формування розподілу напружень по шарах шини*

2. Ларін О. О. Визначення статичного напружено–деформованого стану пневматичної шини в лінійній тривимірній постановці / Ю. В. Арефін, О. М. Ларін, О. О. Ларін, О. І. Субочев // Вісті Автомобільно-дорожнього інституту. – Горлівка: Автомобільно-дорожній інститут ДонНТУ. – 2010. – №. 1(10). – С. 54–58.

*Здобувачу належить постановка задачі, методика побудови тривимірної розрахункової моделі шини та аналіз результатів проведених розрахунків*

3. Ларін О. О. Розробка багатошарової 3D комп'ютерної моделі пневматичної шини з урахуванням ортотропії її механічних властивостей / Ю. В. Арефін, О. М. Ларін, О. О. Ларін, О. І. Субочев // Вісник СевНТУ. Серія: Машиноприладобудування та транспорт. – Севастополь: Севастопольській національний технічний університет. – 2011. – №. 121. – С. 102–105.

*Здобувачу належить постановка задачі, розроблена розрахункова модель пневматичної шини, що дозволяє врахувати криволінійну ортотропію механічних властивостей в тривимірній постановці.*

4. Ларін О. О. Моделювання контактної взаємодії пневматичних шин з дорогою з урахуванням геометричної та фізичної нелінійності їх деформування / А. А. Кондикова, О. О. Ларін // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2011. – №. 52. – С. 94 – 101.

*Здобувачем досліджено вплив на достовірність розрахункових моделей пневматичних шин урахування геометричної та фізичної нелінійностей їх деформування в контакт з дорожньою основою.*

5. Ларін О. О. Визначення напружено–деформованого стану пневматичної шини на основі тривимірної нелінійної моделі / Ю.В. Арефін, О. М. Ларін, О. О. Ларін, О.І. Субочев // Вісті Автомобільно-дорожнього інституту. – Горлівка: Автомобільно-дорожній інститут ДонНТУ. – 2011. – №. 1(12). – С. 71–77.

*Здобувачем розроблена розрахункова модель пневматичної шини, що дозволяє врахувати криволінійну ортотропію механічних властивостей в тривимірній постановці та геометричну нелінійність, чисельно-досліджено особливості формування НДС.*

6. Ларин А. А. Исследование деформирования шины при ее стационарном прямолинейном качении по дороге / Ю. В. Арефин, А. А. Ларин // Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. – Харків: ХНАДУ. – 2011. – №. 55. – С. 32–36.

*Здобувачу належать постановка задачі, математична модель контактної взаємодії шини з дорожньою основою в плоскій повздожній постановці.*

7. Ларин А. А. Исследование закономерностей деформирования пневматических шин в контакте с дорогой у учетом наличия эксплуатационной деградации материала / Ю. В. Арефин, А. А. Ларин. // Механіка та машинобудування. – Харків: НТУ «ХП». – 2011. – №. №2. – С. 52–57.

*Здобувачу належить постановка задачі, а також розроблена СЕ модель контактної взаємодії пневматичної шини з твердою основою, виявлені закономірності зміни параметрів НДС в шині внаслідок деградації характеристик матеріалів.*

8. Ларин А. А. Компьютерное автоматизированное проектирование пневматических шин легковых автомобилей / М. И. Лобас, А. Ларин // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Харків: Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАІ». – 2011. – №. 50. – С. 68 – 74.

*Здобувачем запропоновано систему параметризації профіля пневматичної шини, розроблені алгоритми для скриптових програм автоматизованого проектування тривимірних моделей пневматичних шин.*

9. Ларин А. А. Прогнозирование ресурса конструкций при многоцикловой усталости с учетом деградации свойств материала / А. А. Водка, А. А. Ларин // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХП». – 2012. – №. 67. – С. 67 – 77.

*Здобувачем запропоновано розрахунковий метод визначення ймовірнісних характеристик ресурсу механічної системи при відмовах утоми з урахуванням деградації матеріалу, що спостерігається при тривалій експлуатації.*

10. Ларін О. О. Діагностування технічного стану пневматичних шин по зміні вибігу автомобіля / О. О. Ларін, Ю. В. Арефін // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – Луганськ: СНУ ім. В. Даля. – 2012. – № 9 (180). – С. 148-150.

*Здобувачем запропоновано математичну модель оцінки ресурсу пневматичних шин, що використовувалась для оцінки її технічного стану.*

11. Ларін О. О. Прогнозування залишкового ресурсу в томи пневматичних шин по зміні вибігу автомобіля / Ю. В. Арефін, В. П. Волков, О. М. Ларін, О. О. Ларін // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2012. – №. 60(966). – С. 127–132.

*Здобувачем запропоновано лінійну модель накопичення втоми в навантажених точках пневматичних шин та досліджено особливості формування її залишкового ресурсу.*

12. Larin A. Two-scale approach to modelling of pneumatic tyres / V. Mateichyk, J. Petrova, A. Larin // Systems and means of motor transport. Selected problems. Seria: Transport. – Rzeszow: Politechnika Pzeszowska Im. Ignacego Lukaszewicza. – 2013. – N. 4. – P. 123 – 128.

*Здобувачем розроблено підхід до багато-масштабного скінчено-елементного моделювання елементів машинобудівних конструкцій з гумо-кордних композитів.*

13. Ларин А. А. Применение двухмасштабного подхода к моделированию пневматических шин / В. П. Матейчик, Ю. А. Петрова, А. А. Ларин // Вісник СевНТУ. Серія: Машиноприладобудування та транспорт. – Севастополь: Севастопольській національний технічний університет. – 2013. – №. 143. – С. 118–121.

*Здобувачу належить постановка задачі та розроблена методологія багато-масштабного скінчено-елементного моделювання пневматичних шин легкових автомобілів.*

14. Ларін О. О. Визначення циклів напружень елементів пневматичної шини з використанням процедури субмоделювання / Ю. А. Петрова, О. О. Ларін // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». — 2014. — №. 57. — С. 37–49.

*Здобувачем проведено оцінку особливостей формування НДС на основі методології багато-масштабного скінчено-елементного моделювання пневматичних шин легкових автомобілів. Проведено розрахункові дослідження.*

15. Larin O. O. A probability approach to the estimation of the process of accumulation of the high-cycle fatigue damage considering the natural aging of a material / O. O. Larin, O. O. Vodka // International Journal of Damage Mechanics. — 2014. — Vol. 24, N 2. — P. 294–310.

*Здобувачем запропоновано розрахунковий метод визначення ймовірнісних характеристик ресурсу механічної системи з урахуванням експлуатаційної варіації характеристик НДС.*

16. Larin O. Probabilistic methodology for the prediction of the reliability and lifetime estimation of the toroidal composite tube taking into account aging of the materials degradation / O. Larin // Scientific Proceedings “NDT days 2014”, Sofia, Bulgaria. – 2014. – N 1(150). – P. 540 – 544.

17. Larin O. O. The fatigue life-time propagation of the connection elements of long-term operated hydro turbines considering material degradation / O. I. Trubayev,

O. O. Vodka, O. O. Larin // PNRPU Mechanics Bulletin. – Perm: Perm National Research Polytechnic University. – 2014. – N. 1. – P. 164 – 190.

*Здобувачем запропоновано метод до прогнозування втомного ресурсу механічної системи, яка перебуває у тривалій експлуатації, і враховує випадкове зменшення у часі границі втомної міцності матеріалу.*

18. Ларин А. А. Оценка надежности болтовых соединений по системе из двух типов отказов / А. А. Водка, А. А. Ларин, А. И. Трубаев // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка. Серія: «Проблеми надійності машин та засобів механізації сільськогосподарського виробництва». – Харків: ХНТУСГ. – 2014. – №. 151. – С. 26–32.

*Здобувачем отримано аналітичні вирази для функції щільності ймовірності втомної пошкоджуваності та досліджено формування ймовірності безвідмовної роботи механічної системи з урахуванням процесу деградації матеріалу, що знаходиться в тривалій експлуатації.*

19. Ларин А. А. Прогнозирование усталостного ресурса пневматических шин с учетом старения свойств материалов в процессе эксплуатации / А. А. Ларин // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – №. 10(1053). – С. 84–94.

20. Larin O. O. Probabilistic model of fatigue damage accumulation in rubber-like materials / O. O. Larin // Strength of Materials. – 2015. – Vol. 47, №. 6. – P. 849–858.

21. Ларін О. О. Визначення показників надійності напівпричепу автоцистерни в експлуатації методами комп'ютерної механіки / К. Є. Грінченко, О. О. Ларін // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». — 2015. — №. 39 (1148). — С. 47–56.

22. Ларін О. О. Експериментальні дослідження параметрів пружності та статичної міцності гумової суміші, що входить до складу елементів пневматичних шин після її штучного старіння / О. О. Ларін // Вісник Житомирського державного технологічного університету. – Житомир: ЖДТУ. – 2015. – №. 3(74). – С. 21–26.

23. Ларін О. О. Розробка інформаційної системи автоматизованої побудови комп'ютерних моделей пневматичних шин легкових автомобілів / А. В. Козлюк, О. О. Ларін // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2015. – №. 14. – С. 93–99.

*Здобувачем розроблені алгоритми та специфікації програмного забезпечення для САПР побудови пневматичних шин.*

24. Ларін О. О. Експериментальні дослідження параметрів пружності та статичної міцності гумового композиту, що посиленний текстильним кордом / О. О. Ларін // Наукові нотатки. – Луцьк: Національний луцький технічний університет. — 2015. — №. 52. — С. 275–280.

25. Ларін О. О. Дослідження зміни ймовірнісних характеристик відмов утоми в гумових матеріалах у звичайному стані та після старіння / О. О. Ларін // Науковий вісник Національного Лісотехнічного Університету України. – Львів: ДВНЗ НЛТУ України. — 2015. — №. 10. — С. 307–311.

26. Ларін О. О. Дослідження характеристик опору втомі гумових сумішей, що входять до складу елементів пневматичних шин після штучного старіння матеріалу / О. О. Ларін // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». — 2015. — №. 46. — С. 45–50.

27. Ларін О. О. Визначення характеристик жорсткості пневматичних шин методами комп'ютерного тривимірного моделювання / О. О. Ларін, О. С. Ісак // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія: «Машинобудування». – К.: НТУУ «КПІ». – 2015. – №. 75. – С. 104–114.

*Здобувачу належить постановка задачі, підходи та алгоритми вивчення функціональних характеристик пневматичних шин та аналіз отриманих результатів*

28. Ларін О. О. Аналіз надійності та прогнозування ресурсу втомі пневматичної шини з використанням двомасштабного субмоделювання / Ю. А. Петрова, О. О. Ларін // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка. Серія: «Проблеми надійності машин та засобів механізації сільськогосподарського виробництва». – Харків: ХНТУСГ. — 2015. — №. 163. — С. 31–39.

*Здобувачем проведено багато-масштабне скінчено-елементне моделювання пневматичних шин легкових автомобілів, а також теоретичні основи розрахунку характеристик їх надійності*

29. Ларін О. О. Імовірнісна модель накопичення пошкоджуваності втомі в гумоподібних матеріалах / О. О. Ларін // Проблеми прочності. – Киев: Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины. – 2015. – №. 6. – С. 84–94.

30. Ларін О. О. Дослідження ресурсу напівпричепу автоцистерни при русі по дорогам із покриттям різної якості / К. Є. Потопальська, О. О. Ларін // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». — 2015. — №. 57. — С. 54–59.

*Здобувачем запропоновано метод до прогнозування надійності механічної системи з урахуванням випадкової варіації параметрів НДС.*

31. Larin O. Experimental observations of orthotropic elastic and viscoelastic characteristics of the elastomeric textile reinforced composites / O. Larin, E. Barkanov, I. Petrova // Innovative solutions in repair of gas and oil pipelines, Bulgarian Society for destructive testing Publishers, BAS, Sofia. - 2016. - P.192–203.

*Здобувачем виконані експериментальні дослідження, щодо визначення пружних та міцнісних характеристик гумових композитів, які мають посилення односпрямованим текстильним кордом. Проведено обробку експериментальних даних.*

32. Larin O. Prediction of reliability of the corroded pipeline considering the randomness of corrosion damage and its stochastic growth / O. Larin, E. Barkanov, O. Vodka // Engineering Failure Analysis. – 2016. – Vol. 66. – P. 60–71.

*Здобувачем запропоновано розрахунковий метод прогнозування надійності механічної системи з явним врахуванням стохастичного процесу зміни параметрів системи, що визначають її роботоздатність.*

33. Ларін О. О. Дослідження деформування пружної гумокордної амортизаційної прокладки при імпульсному навантаженні / О. О. Ларін // Науковий вісник будівництва. – Харків: Харківський національний університет будівництва і архітектури. – 2016. – №. 1(83). – С. 240–244.

34. Ларін О. О. Експериментальні дослідження ортотропних пружних і в'язкопружних характеристик еластовимірних текстильно армованих композитів / О. О. Ларін, Ю. А. Петрова // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – №. 18. – С. 55–59.

*Здобувачем виконано експериментальна дослідження, щодо визначення пружних та міцнісних характеристик гумових композитів, які мають посилення односпрямованим текстильним кордом. Проведено обробку експериментальних даних.*

35. Ларін О. О. Дослідження особливостей контактної взаємодії пневматичних шин з жорсткою основою в залежності від рівня вертикального навантаження / Ю. А. Петрова, О. О. Ларін // Наукові нотатки. – Луцьк: Національний луцький технічний університет. — 2016. — №. 55. — С. 275–280.

*Здобувачу належить постановка задачі, алгоритми вивчення характеристик контактної взаємодії пневматичних шин з твердою основою. Проведено аналіз отриманих результатів.*

36. Пат. 101841 Україна, МПК В 60 С 23/04 Комплекс для керування шинами колісних транспортних засобів й призначення оптимальних їх температур, шляхом рідинного охолодження і тисків / О. О. Ларін, В. П. Матейчик, О. М. Ларін // Заявник та патентообладач Національний Транспортний Університет (Україна). – № а 2013 10171; заявл. 19.08.2013; опубл. 12.10.2015, Бюл. № 19.

*Здобувачу належить математична модель пневматичної шини та дослідження щодо формування особливостей утворення циклів деформацій пневматичних шин із різним внутрішнім тиском.*

37. Ларін О. О. Інформаційна система проектування пневматичних шин. Науковий твір / О. О. Ларін, А. В. Козлюк // Свідectво про реєстрацію авторського права на твір. – № 63129. – Державна служба інтелектуальної власності України, 23.12.2015.

*Здобувачу належить постановка задачі, розроблені алгоритми та специфікації програмного забезпечення для САПР побудови пневматичних шин*

38. Larin O. O. A probability approach to the prediction of the high-cycle fatigue lifetime considering aging degradation of the material / O. O. Larin, O. O. Vodka // Proceedings of the 4th Intern. Conference “Nonlinear Dynamics-2013” June 19-22, 2013, Sevastopol. – Kharkiv: “Tochka. — 2013. — P. 393–400.

*Здобувачем запропоновано розрахунковий метод визначення ймовірнісних характеристик ресурсу механічної системи з врахуванням процесу зменшення у часі границі втомної міцності матеріалу.*

39. Ларін О. О. Дослідження власних коливань пневматичної шини як циклічно симетричної системи / О. О. Ларін, Ю. В. Арефін, О. І. Субочев, О. М. Ларін // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XVIII Міжнар. наук.-практичної конф., 12–14 травня 2010 р., Харків. – Ч.1. — 2010. — С. 69.

*Здобувачу належить математична модель щодо визначення характеристик пневматичної шини, а також аналіз результатів проведених розрахунків.*

40. Ларин А. А. Диагностирование остаточного усталостного ресурса шины по изменению ее момента сопротивления качению / А. А. Ларин, Ю. В. Арефин // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XX Міжнародної науково-практичної конференції, Ч.І, 15-17 травня 2012р., Харків. – Харків, НТУ «ХП». — 2012. — С. 37.

*Здобувачем запропоновано лінійну модель накопичення втоми в навантажених точках пневматичних шин та досліджено особливості формування її залишкового ресурсу.*

41. Ларін О. О. Поліпшення теплового стану пневматичних шин легкових автомобілів в експлуатації за допомогою раціонального вибору теплофізичних параметрів спеціального екрануючого шару / О. О. Ларін, В. П. Матейчик // Тези доповідей III-ї Міжн. наук.-техн. конф. “Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій”. – Львів: КІНПАТРИ ЛТД,. — 2012. — С.

*Здобувачу належить математична модель щодо визначення експлуатаційних характеристик пневматичної шини, а також результати розрахунків циклів зміни деформації в процесі її кочення*

42. Ларин А. А. Вероятностный подход к прогнозированию усталостного ресурса конструкций, находящихся в длительной эксплуатации с учетом естественной деградации материала / А. А. Ларин, А. А. Водка // Тези доповідей Міжнародної науково-практичної конференції «Втома та термовтома матеріалів і елементів конструкцій». – Київ. – 2013. – С. 163–165.

*Здобувачем запропоновано розрахунковий метод визначення ймовірнісних характеристик ресурсу механічної системи, з урахуванням стохастичного процесу зменшення у часі границі втомної міцності матеріалу та експлуатаційної варіації характеристик НДС*

43. Ларін О. О. Застосування багато масштабного підходу до моделювання надійності пневматичної шини, як елемента системи «автомобіль-шина-дорога» / О. О. Ларін, В. П. Матейчик // Тези доповідей 11 Міжнародний симпозіум українських інженерів механіків у Львові, 2013, Львів. – Львів: Кінпатрі ЛТД. – 2013. – С. 117–188.

*Здобувачу належить постановка задачі та розроблена методологія багато-масштабного скінчено-елементного моделювання пневматичних шин легкових автомобілів. Проведено розрахункові дослідження.*

44. Ларин А. А. Исследование прочности пневматической шины при двухмасштабном рассмотрении её композиционной структуры / А. А. Ларин, А. А. Кондрикова // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здо-

ров'я: Тези доповідей XXI Міжнар. наук.-практ. конференції. Ч.1. – Харків: НТУ «ХП». – 2013. – С. 39.

*Здобувачу належить постановка задачі та розроблена методологія багато-масштабного скінчено-елементного моделювання пневматичних шин легкових автомобілів. Проведено розрахункові дослідження.*

45. Ларин А. А. Применение двухмасштабного компьютерного моделирования к описанию свойств и напряженно-деформированного состояния пневматических шин / А. А. Ларин // Тезисы докладов Междун. конф. «Современные проблемы естественных наук «Тараповские чтения – 2013», Харьков, 2013 г. – Харків: – 2013. – С. 52–53.

46. Ларин А. А. Вероятностный подход к определению ресурса болтовых соединений рабочих колес поворотных лопастных гидротурбин / А. А. Ларин, А. А. Водка, А. И. Трубаев // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXII Міжн. науково-практичної конференції, Ч.1, 15-17 жовтня 2014 р., Харків. – Харків, НТУ «ХП». – 2014. – С. 42.

47. Ларин А. А. Исследование взаимного влияния НДС и теплогенерации в элементах пневматических шин при взаимодействии с дорожным покрытием / А. А. Ларин, Ю. А. Петрова // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXIII міжнар. наук.-практичної конф., 20–22 травня 2015 р., Харків. – Ч.1. – Харків: НТУ «ХП». – 2015. – С. 52.

*Здобувачу належать результати визначення характеристик НДС пневматичної шини. Проведено розрахункові дослідження.*

48. Ларін О. О. Аналіз кінетики стохастичного процесу накопичення пошкоджуваності втоми в гумових матеріалах з урахуванням старіння / О. О. Ларін // Тезисы докладов международной конференции «Современные проблемы естественных наук «Тараповские чтения – 2016, Харьков, 1 – 4 марта 2016 г. – Харків: «Цифрова друкарня N1». – 2016. – С. 35.

49. Ларін О. О. Оцінка пружних експлуатаційних характеристик пневматичних шин в залежності від рівня навантаження / Ю. А. Петрова, О. О. Ларін // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXIV Міжнародної науково-практичної конференції, Ч.1, 18-20 травня 2016р., Харків. – Харків, НТУ «ХП». – 2016. – С. 62.

*Здобувачу належить постановка задачі, підходи та алгоритми вивчення функціональних характеристик пневматичних шин та аналіз отриманих результатів.*

## АНОТАЦІЇ

**Ларін О.О. Теоретичні основи прогнозування надійності елементів машин з гумо-кордними композитами при відмовах, що викликані втомою.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2016.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню науково-прикладної проблеми, яка полягає у створенні розрахункових методів визначення ресурсу машинобудівних елементів конструкцій з гумо-кордними композитами та їх складовими. У роботі запропоновано моделі накопичення втомої пошкоджуваності в матеріалах, що вивчаються, при їх циклічному деформуванні на скінченних рівнях деформацій в рамках теорії континуальної механіки пошкоджуваності, з урахуванням одночасного протікання процесів деградації їх властивостей внаслідок старіння.

Встановлено характеристики пружності, міцності та опору втомі типових гумових матеріалів та гумо-кордних композитів, а також закономірності їх зміни внаслідок старіння на основі проведеного комплексу експериментальних досліджень.

Сформульовано підхід до створення ієрархічної системи розрахункових скінчено-елементних моделей різного масштабу розгляду гумо-кордних композиційних елементів машин. Запропоновано СЕ моделі автомобільних пневматичних шин, багатошарових амортизаційних прокладок, гумо-кордних тороїдальних компенсаторних муфт, що враховують особливості їх тривимірної багатошарової конструкції, криволінійну ортотропію механічних властивостей. Із використанням розроблених моделей досліджено особливості формування функціонально-експлуатаційних характеристик зазначених елементів машинобудівних конструкцій, а також проведено прогнозування їх надійності.

**Ключові слова:** надійність, ресурс, гумо-кордні композити, континуальна пошкоджуваність, втома, старіння, багато-масштабне СЕ моделювання, гумові шланги, пневматичні шини, багатошарові амортизаційні прокладки.

**Ларин А.А. Теоретические основы прогнозирования надежности элементов машин с резинокордными композитами при отказах, вызванных усталостью.** - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.09 – динамика и прочность машин. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2016.

Диссертация посвящена решению научно-прикладной проблемы, которая заключается в создании расчетных методов определения ресурса машиностроительных элементов конструкций с резинокордными композитами и их составляющими на основе создания вероятностных математических моделей накопления повреждаемости и научно-обоснованных подходов к определению характеристик НДС в соответствующих конструктивных элементах машин.

В работе предложены усовершенствованные вероятностные модели накопления усталостной повреждаемости в изучаемых материалах при их циклическом деформировании на конечных уровнях деформаций в рамках теории континуальной механики повреждаемости. Соответствующие модели позволяют учесть случайный во времени разброс характеристик сопротивления усталости материалов вызванный процессом старения. Предложены подходы к определению вероятностных характеристик повреждаемости и ресурса на основе

данных моделей в том числе и с учетом наличия возможного случайного разброса характеристик напряженно-деформированного состояния. Определена связь между характеристиками классической кривой усталости и параметрами кинетического уравнения накопления усталостной повреждаемости в соответствии с предложенной моделью, что позволило разработать метод для определения параметров модели на основе известных экспериментальных данных.

Проведена серия экспериментальных исследований по определению характеристик упругости, прочности и сопротивления усталости типичных резиновых материалов и резинокордных композитов до и после их искусственного старения. Установлены закономерности изменения характеристик данных материалов в результате старения.

Сформулировано методологический подход к созданию иерархической системы расчетных конечно-элементных моделей различного масштаба рассмотрения резинокордных композиционных элементов машин. На основе данного подхода предложены КЭ модели пневматических шин, многослойных амортизационных прокладок, резинокордных тороидальных компенсаторных муфт, которые учитывают особенности их трехмерной многослойной конструкции и криволинейную ортотропию механических свойств. С использованием разработанных моделей исследованы особенности формирования функционально-эксплуатационных характеристик указанных элементов конструкций, а также проведено прогнозирование их надежности.

Разработана информационная система, которая позволяет автоматизировать процесс построения геометрических и расчетных моделей пневматических шин для широко класса их типоразмеров и конструктивных вариаций на основе автоматизации взаимодействия конструктора с существующими универсальными программными комплексами.

**Ключевые слова:** надежность, ресурс, резинокордные композиты, континуальная повреждаемость, усталость, старение, много-масштабное КЭ моделирование, резиновые шланги, пневматические шины, многослойные амортизационные прокладки.

**Larin O.O. Theoretical basis of reliability prediction of machine elements with rubber-cord composites caused by fatigue failures.** - Manuscript.

The thesis is presented for scientific degree of doctor of technical sciences, speciality 05.02.09 - Dynamics and strength of machines. - National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, 2016.

The thesis deals with a solution of a scientific and practical problem of development of computational methods of determination of mechanical engineering elements life-time with rubber-cord composites and their components based on creation of probabilistic mathematical models describing fatigue damage accumulation and scientific-based approaches for definition of characteristics of a deformed state in those structural elements.

The work offers improved probabilistic models of the fatigue damage accumulation in the subject materials under cyclic deformation with finite strain amplitudes

in the framework of continuum damage mechanics. The appropriate models take into account a random scatter of the material fatigue resistance characteristics, along with simultaneous passing of stochastic processes of material properties degradation caused by natural aging.

The approaches are developed for determination of the probability characteristics of the machine elements fatigue damage and life-time considering presence of possible operational random variation of the characteristics of the deformed state. New analytical formulations have been obtained for the determination of a one-dimensional probability density function for the process of damage fatigue accumulation basing on the offered mathematical models. A relation between the characteristics of the classical S-N curve and parameters of a fatigue damage kinetic equation within the offered model has been found. It allows to determine the required material damage parameters basing on the known experimental data.

A series of experimental researches has been carried out for identification of the characteristics of elasticity, strength and fatigue resistance parameters for a typical rubber-like materials and rubber-cord composites. The study has been performed for specimens before and after artificial aging. Regularities of changes in the characteristics of the materials caused by aging have been analysed.

A methodological approach is formulated for creation of a hierarchical system of FE models with a different scale of rubber-cord elements representation. In the framework of the approach: macro-models integrally represent the composite as orthotropic homogeneous material that makes it possible to solve practical problems, considering the main design features, operational conditions etc. Micro-level models allow to estimate internal concentration of stresses and strains in the rubber-cord composites. Basing on this approach a number of hierarchical systems of FE models have been developed for automobile pneumatic tires, multilayer amortizing cushion, rubber-cord toroidal compensatory tubes and hoses that take into account the peculiarities of their three-dimensional multi-layer internal structure and curve-linear orthotropy of mechanical properties. A formation of functional performance of the mentioned engineering designs along with characteristics of their reliability have been analysed basing on the developed models. The lifetime forming features of the pneumatic tires and toroidal tubes with different service loading have been studied along with the influence of the intensity of the aging process.

It has been developed an informational system that allows to automate the creation process of geometrical and computational FE models of pneumatic tires for a wide class of their sizes and design variations. The informational system is developed as integrated software based on the existing CAD/CAE programs.

**Keywords:** reliability, service life, rubber-cord composites, continual damage parameters, fatigue, aging, multi-scale finite element modelling, rubber hoses, pneumatic tires, multilayer cushioning pads.



Підписано до друку 07.11.2016 р.  
Формат 60x84/16. Папір офсетний.  
Друк цифровий. Умовн. друк. арк. 1,8.  
Гарнітура Times New Roman. Тираж 100 прим. Замовлення № 21

---

Надруковано у копії-центрі «МОДЕЛІСТ» (ФО-П Миронов М.В.)  
Свідоцтво ВО4№022953  
м. Харків, вул. Мистецтв, 3 літер Б-1  
тел. 7-170-354  
[www.modelist.in.ua](http://www.modelist.in.ua)

---