

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”**

ВЯЗОВИЧЕНКО ЮЛІЯ АНДРІЇВНА



УДК 539.32:536.37

**ТЕРМО-НАПРУЖЕНИЙ СТАН В'ЯЗКОПРУЖНИХ ГУМОКОРДНИХ
ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ З УРАХУВАННЯМ РОЗСІЮВАННЯ ЕНЕРГІЇ
ПРИ ЦИКЛІЧНОМУ ДЕФОРМУВАННІ**

Спеціальність 05.02.09 – динаміка та міцність машин

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2021

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі динаміки та міцності машин Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник

доктор технічних наук, доцент

Ларін Олексій Олександрович,

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
директор навчально-наукового інженерно-
фізичного інституту.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук,
старший науковий співробітник

Сметанкіна Наталя Володимирівна

Інститут проблем машинобудування імені
А. М. Підгорного НАН України, завідувачка
відділу вібраційних і термоміцнісних
досліджень;

кандидат технічних наук, науковий співробітник

Деркач Олег Леонідович

Інститут проблем міцності імені Г. С. Писаренка
НАН України, науковий співробітник відділу
коливань і вібраційної надійності.

Захист відбудеться 13.05.2021 р. о 14.30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.10 в Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2, а також на сайті <http://blogs.kpi.kharkov.ua/v2/vrada/>

Автореферат розісланий «12» квітня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Олексій ВОДКА

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Еластоміри та їхні композити широко використовуються в сучасній інноваційній техніці (таких галузей як автомобільна, авіаційна, енергетична), в будівельній інженерії та технологічному машинобудуванні. Зокрема, армовані еластоміри використовують для виробництва авіаційних та автомобільних шин; антивібраційних елементів (гумо-металеві пружини, демпфери), еластомірних підшипників; застосовуються у підвісах валів, як прокладки між деталями конструкцій, опорних частин та кріплень.

Елементи конструкцій з гумокордних композитів в експлуатації проявляють широкий спектр особливостей, які потрібно враховувати при їх застосуванні, а саме: наявність гіперпружних і в'язкопружних властивостей, виникнення помірних деформацій, температурна чутливість. Аналіз їхніх типових застосувань дозволяє констатувати їх високу динамічну навантаженість, зокрема циклічного характеру, що супроводжується утворенням петель гістерезису та, як наслідок, виникнення явища самонагріву. В свою чергу, підвищення температури у середині матеріалів викликає суттєві зміни у механічних властивостях, знижує характеристики міцності, завдає істотного впливу протіканню втомних процесів, прискорює процеси старіння та деградації. Все це призводить до змін у показниках надійності і, як результат, впливає на загальний ресурс як окремих елементів, так і відповідальних вузлів та конструкції в цілому. Цей факт робить актуальною задачею розробку ефективних розрахункових підходів вивчення закономірностей протікання циклічних деформаційних та теплових процесів, що супроводжують роботу елементів з в'язкопружних матеріалів, та оцінку їх впливу на термо-напружений стан (Т-НС) елементів конструкцій, а також їх надійність в залежності від експлуатаційних умов.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано на кафедрі динаміки та міцності машин Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (НТУ «ХПІ») за планами науково-дослідних робіт відповідно до завдань Міжнародного науково-дослідного проекту «Innovative Non-Destructive Testing and Advanced Composite Repair of Pipelines with Volumetric Surface Defects (INNOPIPES)», що відбувся у 2012-2016 рр. в рамках 7-ї Рамкової програми ЄС, Дії Марії Кюрі (Contr. № PIRSES-GA-2012-318874); держбюджетної НДР МОН України «Розробка методів математичного моделювання поведінки нових та композиційних матеріалів для оцінки ресурсу та прогнозування надійності елементів конструкцій» (ДР № 0117U004969), в яких здобувач була виконавцем окремих етапів.

Мета і задачі дослідження. *Метою роботи* є розробка розрахункових методів аналізу процесів циклічного деформування та супроводжуючого дисипативного теплоутворення в гумокордних композитних елементах конструкцій, дослідження їх впливу на термонапружений стан та аналіз закономірностей протікання цих процесів в елементах конструкцій в умовах експлуатації.

Для досягнення зазначеної мети поставлені наступні *завдання*:

– проаналізувати основні чинники, що впливають на термоміцність та надійність гумокордних елементів конструкцій, а також, основні підходи і методи аналізу теплового та напружено-деформованого (НДС) станів в цих елементах конструкцій, та обґрунтувати шляхи вивчення (Т-НС) в'язкопружних композитів з

урахуванням розсіювання енергії при циклічному деформуванні;

- розробити підхід до розрахункового дослідження Т-НС у в'язкопружних композитних елементах конструкцій з урахуванням розсіювання енергії при циклічному деформуванні;

- провести комплекс експериментальних досліджень в'язкопружних властивостей та процесів гістерезисного розсіювання енергії гумокордного композиту;

- розробити математичні моделі та провести прикладні дослідження щодо формування особливостей циклічного деформування в елементах машинобудівних конструкцій (пневматичних шинах) в умовах експлуатації;

- провести прикладні дослідження по визначенню закономірностей утворення Т-НС пневматичної шини внаслідок протікання процесів дисипативного самонагріву в залежності від умов експлуатації.

Об'єктом дослідження є процеси формування термо-напруженого стану в гумокордних елементах конструкцій, що працюють в умовах циклічного деформування з урахуванням розсіювання енергії.

Предмет дослідження – характеристики в'язкопружності гумокордних матеріалів конструкцій, показники НДС та Т-НС елементів конструкцій з гумокордних композитів.

Методи дослідження. Основні теоретичні положення дисертаційної роботи базуються на фундаментальних підходах теорій пружності та в'язкопружності, теплопровідності та термо-пружності. Оцінка циклів НДС проводилась в рамках сучасних засобів комп'ютерного моделювання з використанням методу скінчених елементів (МСЕ), багат шарова структура в них моделювались явно в тривимірній постановці. Експериментальні дослідження матеріалу здійснювалась на установці INSTRON ElectroPuls E3000 Test System. Ідентифікація дисипативних та в'язкопружних характеристик проводилась шляхом обробки експериментальних даних з залученням чисельного моделювання та методу стохастичної оптимізації «0» порядку.

Наукова новизна отриманих результатів:

- вперше запропоновано розрахунковий підхід аналізу термо-напруженого стану в'язкопружних гумокордних елементів, який викликаний та супроводжується накопиченням тепла, що формується в наслідок розсіювання енергії за циклічного деформування;
- експериментально встановлено залежності параметрів в'язкопружності гумокордних композитів від параметрів циклічного навантаження отримані вперше разом с характеристиками процесів самонагріву, які їх супроводжують, що дозволило здійснити зв'язану постановку задачі теоретичного моделювання Т-НС гумокордних елементів конструкцій;
- вперше запропоновано метод та алгоритм розрахунково-експериментальної ідентифікації параметрів в'язкопружності гумокордних елементів конструкції, що, на відміну в існуючих, використовує дані із розсіювання енергії при циклічному деформуванні зразків;
- набули подальшого розвитку підходи до комп'ютерного моделювання теплового та НДС пневматичних шин, які на відміну від існуючих,

враховують складний цикл деформування в експлуатації та процес самонагріву.

Практичне значення отриманих результатів для машинобудування складають підходи до побудови моделей багатошарових елементів конструкцій з урахуванням їх основних особливостей та методики оцінки процесів теплогенерації та Т-НС у них, що формуються під дією циклічних навантажень, а також пакети скрипкових програм, що їх реалізують. Створені розрахункові моделі та визначені основні закономірності формування термо-НДС пневматичних шин в умовах експлуатації, які дають можливість діагностувати небезпечні ділянки конструкції та планувати конструктивні зміни, що в цілому спрямовано на покращення надійності та подовження експлуатаційного ресурсу. Окрему корисно-практичну цінність мають створені алгоритми та програмні застосунки, які реалізують методи визначення дисипативних та в'язкопружних характеристик еластомірних композитів та можуть бути використані для вивчення відповідних характеристик інших матеріалів цього типу.

Результати, отримані в дисертації, впроваджені у відповідності до результатів виконання міжнародного дослідницького проекту «INNOPIPES», реалізація якого відбувалась в рамках 7-ої рамкової програми ЄС, Дії Марії Кюрі. Окрім цього розроблені методики впроваджено у практику проектно-дослідних робіт ТОВ «РОСАВА ТАЙЕРС» (м. Біла Церква, Київська область), а також у навчальний процес НТУ «ХП» (м. Харків).

Особистий внесок здобувача. Усі положення і результати, винесені на захист дисертаційної роботи, отримані здобувачем особисто. Постановка цілей і задач досліджень, аналіз і обговорення отриманих результатів виконувалися здобувачем разом із науковим керівником. В роботах написаних у співавторстві, особистий внесок здобувача полягає у наступному: в роботах [1-3, 10] авторові належать розробка повної СЕ-моделі шини та її субмоделей, результати розрахунків НДС в контакті з дорожнім покриттям; в [5, 12-14, 16-18] – визначення циклів деформування конструкції та вирішення задачі теплопровідності. В роботах [4, 15] здобувачу належать проведення варіантних розрахунків НДС при різних рівнях навантаження; [6, 7] – обробка результатів експериментальних даних. В [8, 9] автору належить постановка і проведення експериментальних досліджень та обробка отриманих даних з визначення в'язкопружних характеристик гумокордів. В роботах [11,19] здобувачем побудовано СЕ модель гумокордного зразка та проведено чисельно-розрахункове дослідження уточнення характеристик матеріалу.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати роботи доповідались на Міжнародних науково-практичних конференціях: «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків, 2015-2016 рр.), XII Міжнародному симпозиумі українських інженерів механіків у Львові (м. Львів, 2015 р.), «Вібрації в техніці та технологіях» (м. Дніпропетровськ, 2015 р.), “Nonlinear dynamics – 2016 (м. Харків, 2016р.), «Современные проблемы естественных наук – Тараповские чтения (м. Харків, 2016р.), «Актуальні проблеми інженерної механіки» (м. Одеса, 2018 р.), Integrated computer technologies in mechanical engineering: (м. Харків, 2020 р.), “PHOTONICS-ODS 2020” (м. Вінниця, 2020р.).

У повному обсязі дисертаційна робота була представлена на розширеному науковому семінарі кафедри динаміки та міцності машин НТУ «ХП» із запрошенням фахівців у галузі.

Публікації. Основний зміст дисертації відображено у 19 наукових публікаціях, з них: 11 статей (9 – у наукових фахових виданнях України (2 з яких включені у наукометричну базу Scopus); 1 – у періодичному закордонному виданні; 1 – у закордонному фаховому виданні), 8 – у матеріалах та тезах міжнародних конференцій.

Структура й обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з анотації двома мовами, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації становить 148 сторінок, з них основного тексту 126 сторінок; 64 рисунків по тексту; 7 рисунків на 7 окремих сторінках; 15 таблиць по тексту; списку використаних джерел з 110 найменувань на 12 сторінках; 2 додатки на 10 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано її мету і задачі, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, визначено наукову новизну та практичну значущість роботи.

Перший розділ присвячено аналізу науково-технічної літератури щодо дослідження підходів до аналізу особливостей роботи в'язкопружних гумокордних елементів конструкцій, протікання у них теплових та деформаційних процесів та їх впливу на Т-НС, міцність та надійність. Відзначені роботи Белкіна А.Е., Бідермана В.Л., Григолюка Е.І, Кваші Е.Н., Кіричевського В.В., Кнорова В.И., Кравченко О.П., Мухіна О.М., Победри Б.Є., Прісса Л.С., Шешеніна С.В., Akasaka T., Baldwin J.M., Cho J.R., Clark S.K., Fervers C.W., Huang S.C., Kaliske M., Kim B.S., Larsson K., Li D., Nackenhorst U., Pelc J., Pacejka H.B та інших, що стосувались досліджень прикладного та фундаментального характеру по роботі гумокордних композитів та машинобудівних конструкцій з ними.

Проаналізовані дослідження, що стосуються циклічного деформування матеріалів та супроводжуються дисипацією енергії. Дослідження цих питань були висвітлені в роботах Писаренко Г.С., Матвєєва В.В., Воробйова Ю.С., Шукаєва С.М., Li Z., Савченко О.В., Деркача О. Л., Mullins L., Zhang J. X., Luo W., Woo C. S., Cardone D., Barkanov E., Shapery R.A., Работнова Ю.М., Hristov J. Y., Brinson H. F., Ghoreishy, Li Z., Payne A. R., Itskov M. та інші. В цих роботах засвідчені факти істотного впливу теплових процесів на пружні та міцнісні характеристики. Критичний аналіз наведених в літературних джерелах даних показує важливість досліджень теплового та Т-НС у гумокордах: підвищення температури всередині матеріалу призводить до виникнення додаткового термо-напруженого стану, значного прискорення деградаційних процесів, пов'язаних зі старінням, а також, впливає на протікання втомних процесів.

У розділі окремо представлено аналіз сучасного стану питань дослідження процесів самонагріву, теплопровідності та термопружності. Відзначені роботи Шупікова О.М., Сметанкіної Н. В., Ольшанського В.П, Park D. M., Cho J. R.,

Cazenove J., Pešek L., Luo W., Ovalle Rodas C., Zaïri F., Rittel та інших.

На основі проведеного аналізу у даному розділі встановлено, що потребують подальшого вивчення та уточнення дослідження зв'язаних деформаційних та теплових процесів, що мають місце в гумокордах за циклічного навантаження. Висновки, які зроблені з аналізу вітчизняної та закордонної наукової літератури, дозволили обґрунтувати актуальність науково-практичної задачі, яка полягає у розвитку методів та підходів до аналізу Т-НС в'язкопружних композитів з урахуванням розсіювання енергії при циклічному деформуванні.

У **другому розділі** викладено запропоновану загальну методологію розрахункового підходу до вивчення термо-напруженого стану у гумокордних елементах конструкцій в експлуатації, здійснено математичні постановки задач, що вирішуються в рамках даної методології в дисертаційному дослідженні.

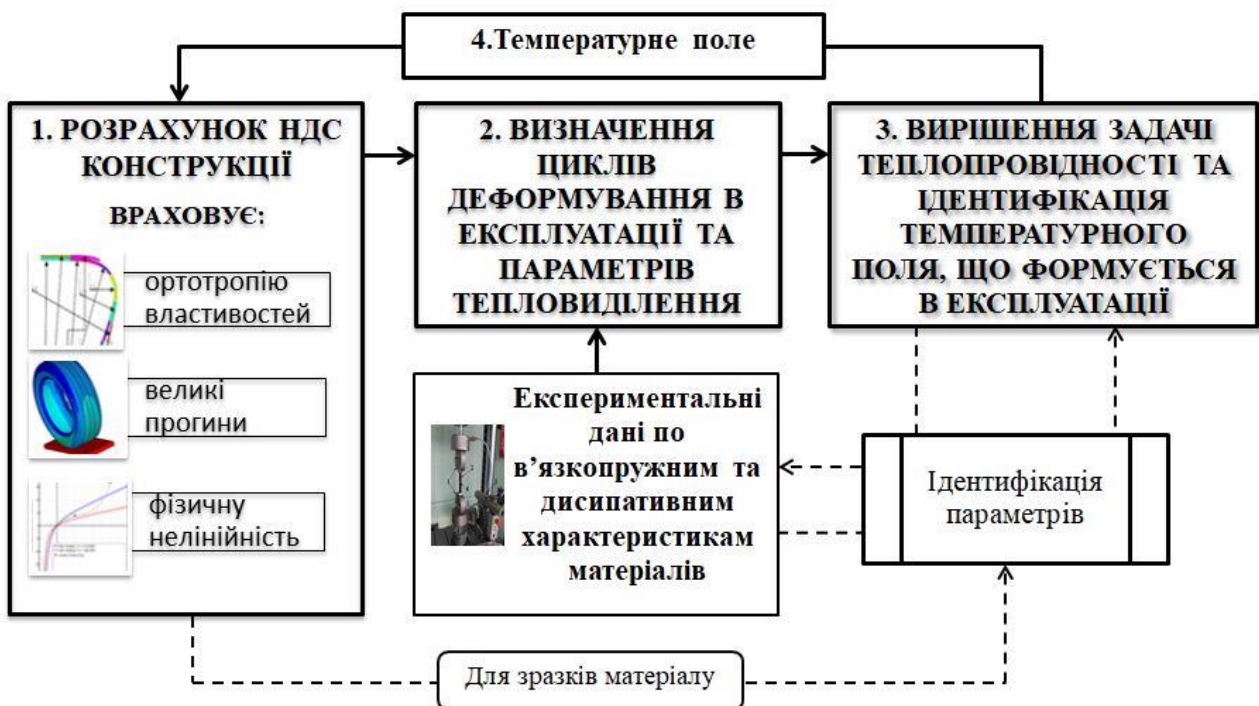


Рисунок 1 – Загальна методологія дослідження

Загальна методологія розрахункового дослідження включає 4 основних етапи (рис. 1):

- I. – вирішення задачі по визначенню НДС конструкції в експлуатації;
- II. – схематизація циклів деформацій та визначенням показників тепловиділення, що формується через розсіювання енергії;
- III. – вирішення задачі теплопровідності, враховуючи розподіл внутрішніх джерел тепла;
- IV. – розрахунок Т-НС, що формується температурним полем.

Перший етап – визначення особливостей деформування проводилось на основі МСЕ. Особливості конструктивних елементів з гумокордних композитів в експлуатації потребують необхідності врахування наявності: складної багатшарової структури, ортотропії механічних властивостей (яка має складну просторову криволінійність), помірних рівнів деформацій, фізичної нелінійності, а також, в'язкопружності та температурної залежності. Врахування одночасно всього

комплексу цих явищ призводить до складної нелінійної мультифізичної задачі, яка для умов наближених до експлуатаційних не має повного розв'язку. В даній дисертації було здійснено припущення, що основні амплітудні значення циклів деформацій з достатньою точністю можна визначити без явного врахування в'язкопружності, а вже на наступному етапі врахувати це явище для обчислення генерації тепла. Така спрощена постановка проводилась на основі МСЕ та зводила перший етап до вирішення нелінійного матричного рівняння для визначення НДС конструкції

$$[K(U)] \cdot U = F, \quad (1)$$

де $[K]$ – матриця жорсткості, U – вектор вузлових переміщень, F – вектор вузлових сил. Пошук розв'язку здійснювався із застосуванням метода Ньютона-Рафсона.

Для моделювання фізичних залежностей у гумових шарах досліджуваних конструкцій використовувалась модель Нео-Гука (2)

$$\sigma = \frac{1}{J} \frac{\partial W}{\partial F} F^T, \quad W = \frac{\mu}{2} (I_1 - 3 - 2 \ln J) + \frac{\kappa}{2} (J - 1)^2, \quad (2)$$

де σ – тензор напружень Коші, I_1 – перший інваріант тензору деформацій, J – детермінант градієнту деформацій (F) та μ, κ – константи матеріалу.

На *другому етапі*, згідно методології, визначається поле джерел теплоутворення. Відповідні значення визначаються пропорційно до площі петлі гістерезису, що формується за цикл деформування при врахуванні в'язкопружності: для цих обчислень необхідно задати зміну деформацій та напружень у часі, за циклічного характеру може бути представлено рядом Фур'є

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 + \sum_{i=1}^N \varepsilon_i \cos \omega_i t, \quad (3)$$

де ε_0 та ε_i – гармоніки розкладання, які були визначені на попередньому етапі зі схематизованих експлуатаційних циклів обчислених у квазістатичній постановці.

Відповідні часові залежності напружень, що враховують в'язкопружну поведінку мають вигляд

$$\sigma(t) = \int_{-\infty}^t G(t - \tau) \frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} d\tau, \quad (4)$$

де $G(t)$ – ядро релаксації. В роботі обмежувались три-параметричною моделлю лінійної в'язкопружності

$$G(t) = E + \hat{E} e^{-\frac{\hat{E}}{\eta} t} = E + \hat{E} e^{-\frac{t}{T_0}}, \quad (5)$$

де $\hat{E}, \eta$ – константи матеріалу; T_0 – час релаксації ($T_0 = \eta / \hat{E}$).

Тоді, на основі (3) і (5) напруження визначаються з (4) і запишуться так

$$\sigma = A e^{-i\lambda t} + B \sum_{i=1}^N b_i \cos \omega_i t + C \sum_{i=1}^N c_i \sin \omega_i t + D, \quad (6)$$

де A, B, C, D, b_i, c_i є константи інтегрування, що залежать від характеристик матеріалу $\hat{E}, T_0$, а також, значень амплітуд деформацій.

Потужність джерела тепла відповідає кількості розсіяної енергії в одиницю часу. Кількість розсіяної за цикл енергії визначається площею петлі гістерезиса і, таким чином, може бути знайдена інтегруванням добутку напружень та швидкості

деформацій.

$$A_D = \int_0^T \sigma \frac{d\varepsilon}{dt} dt = A_D(\hat{E}, T_0, \omega_i, \varepsilon_i) \quad (7)$$

де T період одного циклу деформування.

Третій етап дослідження присвячений визначенню температурного поля конструкції, що утворюється внаслідок самонагріву і пов'язаний з вирішенням задачі теплопровідності. Задача вирішувалась в межах 3d постановки та МСЕ. Відповідне матричне рівняння:

$$[C]\dot{\theta} + [P]\theta = \dot{Q}, \quad \dot{Q} = A_D \frac{1}{T} \quad (9)$$

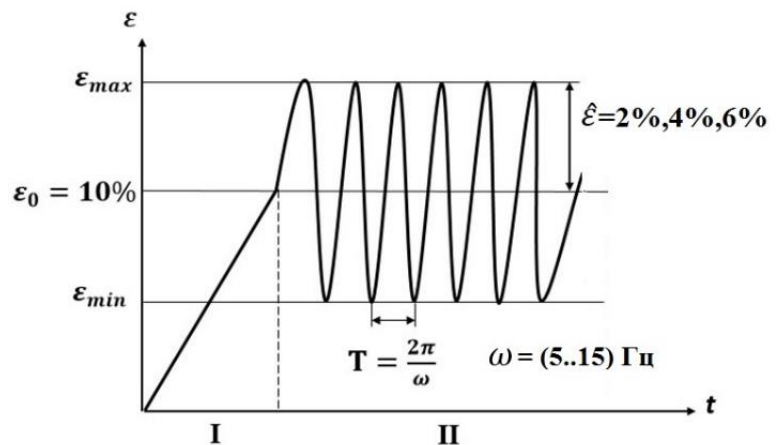
де $[C]$ – матриця теплоємності, $[P]$ – матриця теплопровідності, θ – вузлові значення температури, $\dot{Q}$ вектор потужності джерел теплоутворення.

Вирішення задач, що були поставлені на I та II етапах для прикладних задач потребують наявних експериментальних даних. При цьому важливо мати зв'язані характеристики в'язкопружності та тепловиділення, що забезпечать не лише необхідну для моделювання інформацію, але й експериментально підтвердять достовірності прийнятих гіпотез. Слід відзначити, що існуючі в літературі відомості по відповідним властивостям матеріалів мають надзвичайно суттєвий розкид значень та обмежені дані, що викликано великою різноманітністю матеріалів та їх особливостями, технологічними та комерційними таємницями компаній-виробників.

В роботі було проведено власні експериментальні дослідження дисипативних та в'язкопружних характеристик зразків матеріалу на різних режимах циклічного навантаження. Відповідні результати приведені у **третьому розділі**. Натурні експерименти проводились із зразками, що представляють собою гумову матрицю армовану текстильним кордом на випробувальній установці Instron ElectroPuls E3000 з безконтактним вимірюванням температури (рис. 2).



а)



б)

Рисунок 2 – Установка для вимірювання НДС та температури зразка (а):

1 – експериментальна установка Instron ElectroPuls E3000, 2 – зразок, 3 – лазерний термометр, 4 – місце вимірювання температури; та схема навантаження зразків (б)

За результатами проведених випробувань було визначено криві деформування зразків, що в умовах циклічного навантаження формували петлі гістерезису. Амплітуда деформацій $\hat{\varepsilon}$ задавалась в діапазоні 2% - 6%. Частоти ω – у діапазоні від 5 Гц до 15 Гц із кроком 2.5 Гц.

На рис. 3 зображено характерні петлі гістерезису в залежності від амплітуди та частоти деформування (а, б), а також криві зміни температури зразків в часі (в, г).

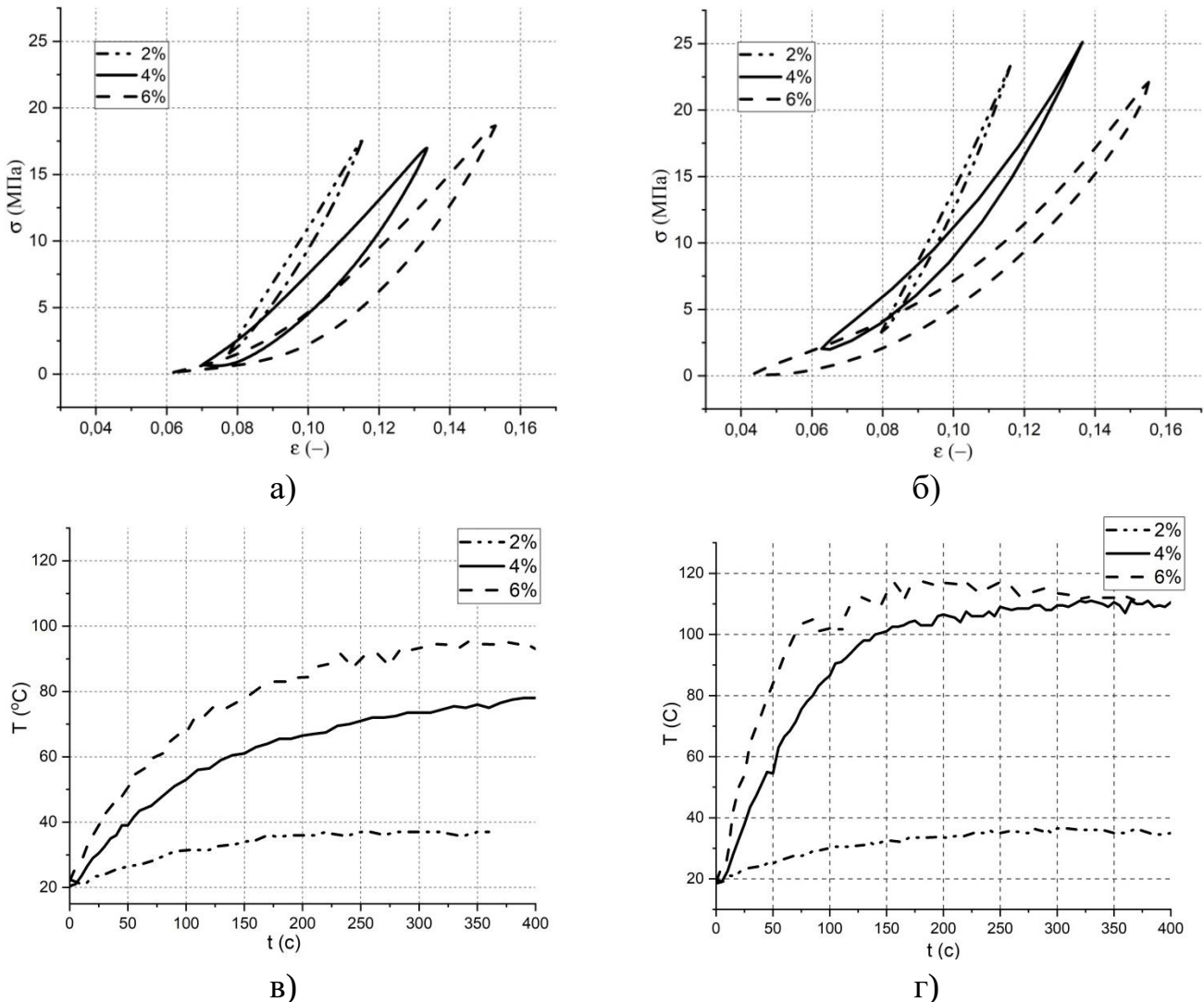


Рисунок 3 – Криві деформування зразків для частоти навантаження 5 Гц (а) та 15 Гц (б); графіки нагріву зразків при частоті 5 Гц (в) та 15 Гц (г)

Попередній аналіз експериментальних даних та його обробка показала, що з одного боку лінійна модель в'язкопружності прийнятно дозволяє описати поведінку в межах однієї амплітуди навантаження, але, з іншого боку, наявні локальні мінімуми в розв'язку задачі нелінійної регресії та має місце амплітудна залежність. Таким чином, визначення коефіцієнтів феноменологічної моделі (6) потребують уточнення в межах фіксованої амплітуди в напрямку пошуку глобального мінімуму для функції мети, яка забезпечить ідентифікацію моделі придатну для подальшого застосування в задачі моделювання та прогнозу Т-НС гумокордних конструкцій, що є метою даної дисертації.

Уточнення результатів ідентифікації в'язкопружних констант проводилось шляхом реалізації розрахунково-експериментального підходу із використанням методу стохастичної оптимізації «0» порядку (імітації відпалу).

Загальна ідея цього підходу полягає у ітераційному застосуванні запропонованої в дисертації методології для ідентифікації характеристик матеріалу (див. рис.1). Тобто, пропонується послідовно пройти всі три етапи по визначенню

деформацій, обчисленню теплогенерації та визначення температурного поля для зразка матеріалу в умовах моделювання, що відтворюють експериментальні дослідження. З проведеного ітеративного моделювання для різних можливих значень характеристик матеріалу, що потребують визначення оброти ті, які забезпечують мінімум похибки температури зразка, що встановилася.

Відповідно до розробленого алгоритму, на кожній ітерації для заданих умов жорсткого навантаження (частота, амплітуда) обчислюється розрахункове значення температури самонагріву. Відхилення даної температури від експериментальних значень мінімізується методом подвійного відпалу для шуканих параметрів моделі. В якості критерію для процедури оптимізації пропонується взяти середньоквадратичну похибку у прогнозі температури усталеного режиму самонагріву на всьому діапазоні частот при фіксованій амплітуді гармонічного навантаження

$$(E_1, t_0, h_c): \min[L_T(E_1, t_0, h_c)] = \min \left[\sum_{j=1}^N \sqrt{\left(T_j^{\text{розн}}(E_1(\omega), t_0, h_c) - T_j^{\text{експ}} \right)^2 \frac{1}{\sigma_j^2}} \right]. \quad (10)$$

Чисельне моделювання експерименту проводилось шляхом послідовного вирішення задач обчислення НДС та теплопровідності у стаціонарній постановці. Компоненти вектора генерації тепла визначаються для синусоїдального простого циклу

$$\dot{Q} = 2G_2 \varepsilon^2 \pi \omega, \quad G_2 = E_1 \frac{2\pi \omega t_0}{1 + (2\pi \omega t_0)^2}, \quad (11)$$

де, згідно лінійної моделі в'язкопружності модуль втрат залежить від двох параметрів E_1 і t_0 , які потребують визначення в межах постановки задачі.

Граничні умови до зразка прикладалися відповідно до умов його закріплення. На поверхні зразка накладалися умови конвективного теплообміну і вказувалася температура навколишнього середовища (рис. 4, а). У об'ємі обмеженого поверхнею B1 задано внутрішнє джерело тепла у вигляді теплогенерації ($\dot{Q}$).

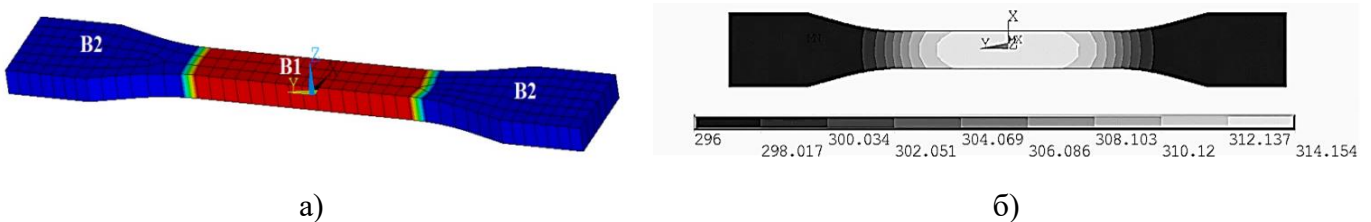


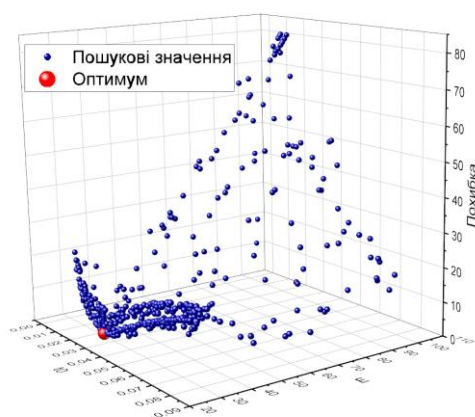
Рисунок 4 – Граничні умови, що прикладаються до зразка (а) та розподіл температури по зразку в стабілізованому стані ($\omega=5$ Гц, $\varepsilon=2\%$) (б)

У таблиці 1 представлені визначені в'язкопружні параметри матеріалу у напрямку вздовж та впоперек армування відповідно. Оцінка похибки оптимізаційної процедури проводилась шляхом порівняння температур отриманих експериментально та під час розрахунку. Достовірність та точність підходу контролювались окремо – порівнянням значень експериментальної і розрахункової площі петлі гістерезису.

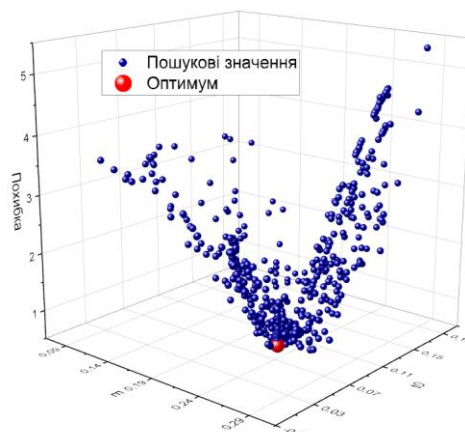
Таблиця 1. Результат процедури оптимізації

Параметри	Вздовж армування		
	2%	4%	6%
E_1 , МПа	31,102121	30,260108	24,498548
t_0 , с	0,03668	0,02323	0,0459
	Впоперек армування		
	2%	4%	6%
E_1 , МПа	2,363886	1,9438869	2,0638899
t_0 , с	0,079	0,082	0,084

Похибка по температурі нагріву складає не більше 3,5%. Оцінка похибки визначення площі петлі гістерезису не перевищує 12% для амплітуд деформацій менших за 6%, а для вищих досягає 36%, що було обумовлено виродженням експериментальних даних. Візуалізація збіжності оптимізаційної процедури продемонстрована на рис. 5 (маркером позначено усі реалізації процедури)



а)



б)

Рисунок 5 – Візуалізація процедура збіжності методу відпау при пошуку параметрів теплових властивостей матеріалу на амплітудах 2% в повздовжному напрямку (а) та 4% в напрямку перпендикулярному до кордного посилення (б)

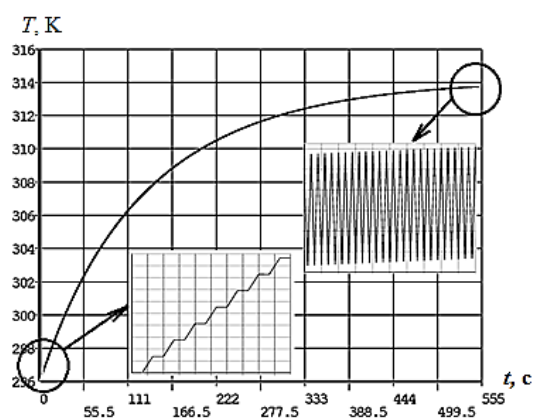


Рисунок 6 – Крива нагріву, яку отримано в результаті розрахунку

На рис. 4, 6 наведено результати чисельної симуляції нагріву зразку для визначених характеристик та отримані розподіли температури за зразком (рис. 5, б) та криву нагріву зразку для тих же умов навантаження показано на рис. 6.

Порівняння кривих нагріву отриманих під час чисельного розрахунку та експериментально зображено на рис. 7.

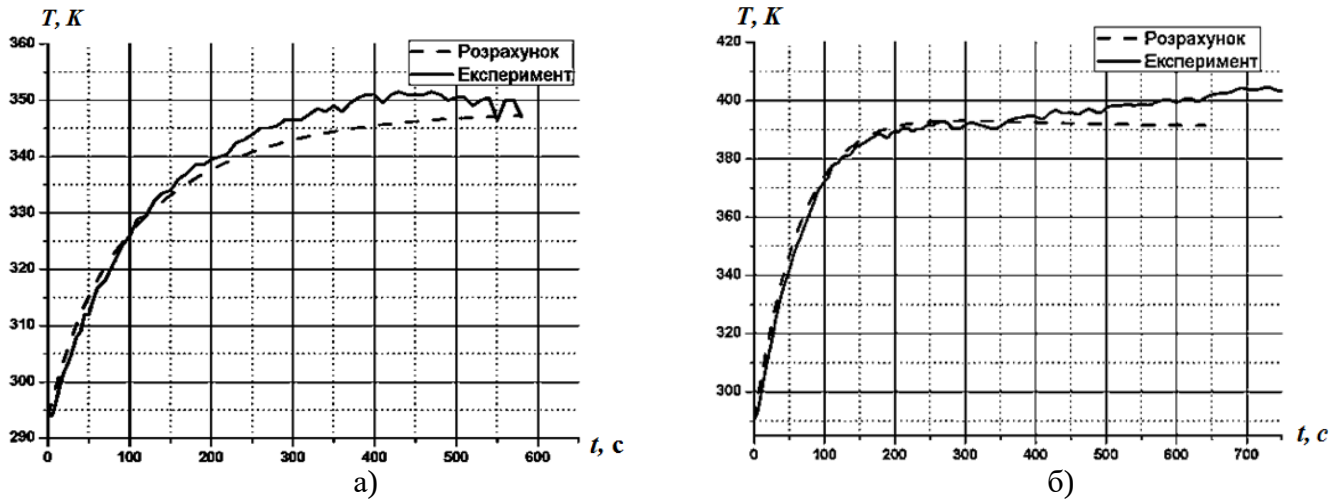


Рисунок 7 – Порівняння результатів розрахунку і експерименту:
а) – частота навантаження 5 Гц; б) – частота навантаження 12,5 Гц

Четвертий розділ присвячений вивченню теплових процесів конструкції в експлуатації на прикладі пневматичної шини марки 205/55R16.

Вирішення практичної задачі оцінки Т-НС експлуатації повторювало чотири етапи дослідження загальної методології (рис. 1) та використовувало результати експериментів. На першому етапі було побудовано модель шини з урахуванням криволінійної геометрії, ортотропії властивостей, геометричної та фізичної не лінійності, з явним моделюванням основних шарів. Криволінійна ортотропія гумокордних шарів враховувалась за рахунок введення локальних фінітно-тороїдальних систем координат (рис. 8).

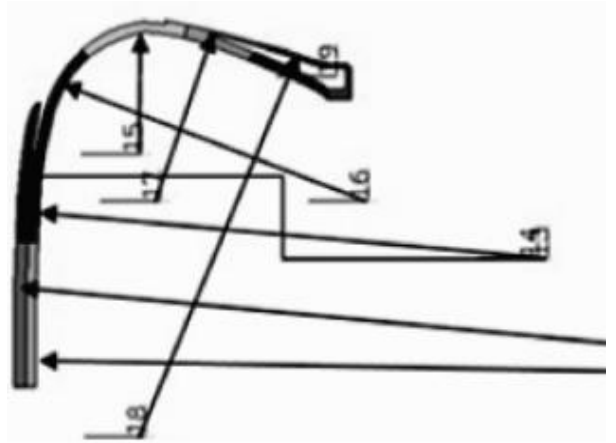


Рисунок 8 – Розташування локальних фінітно-тороїдальних систем координат

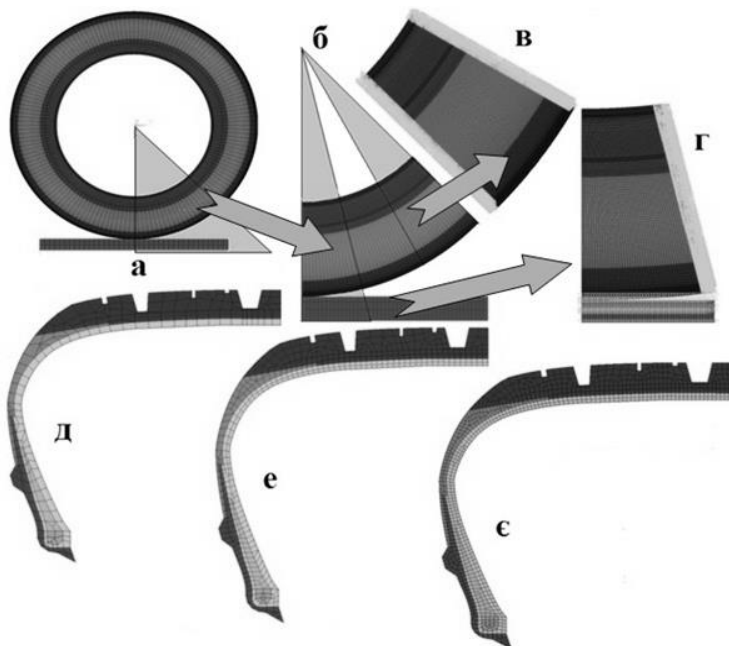


Рисунок 9 – Схема субмоделювання

Шина навантажувалась внутрішнім тиском та вертикальним навантаженням. Задавались граничні умови у місці з'єднання з диском (обмеження переміщень), та контактна взаємодія з дорожнім покриттям (явно моделювалось дорожнє полотно). Через проблеми зі збіжністю вирішення нелінійної задачі великої розмірності, для уточнення результатів було запропоновано використання підходу багатомасштабного субмоделювання (рис 9.).

Будувались три масштаби: деформації уточнювались у зоні контакту та у зоні зміни контактної зони на безконтактну.

З отриманих картин розподілу НДС визначено чотири локації найбільших деформацій (рис. 10, а). Відповідно до них шину було поділено на чотири зони: 1 – підбрєкерну, 2 – плечову, 3 – здвоєння каркасу, 4 – бортову.

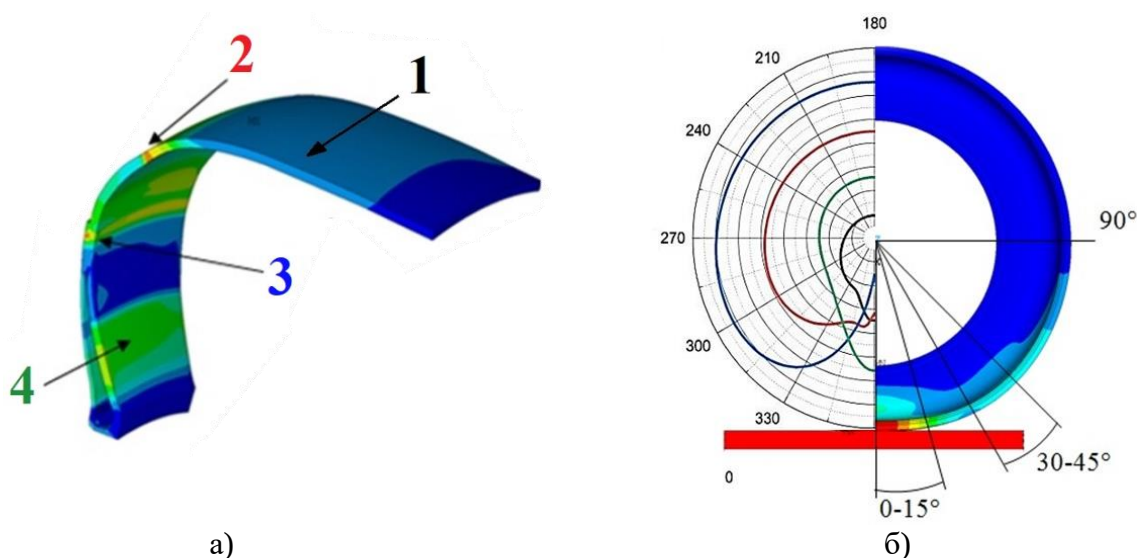
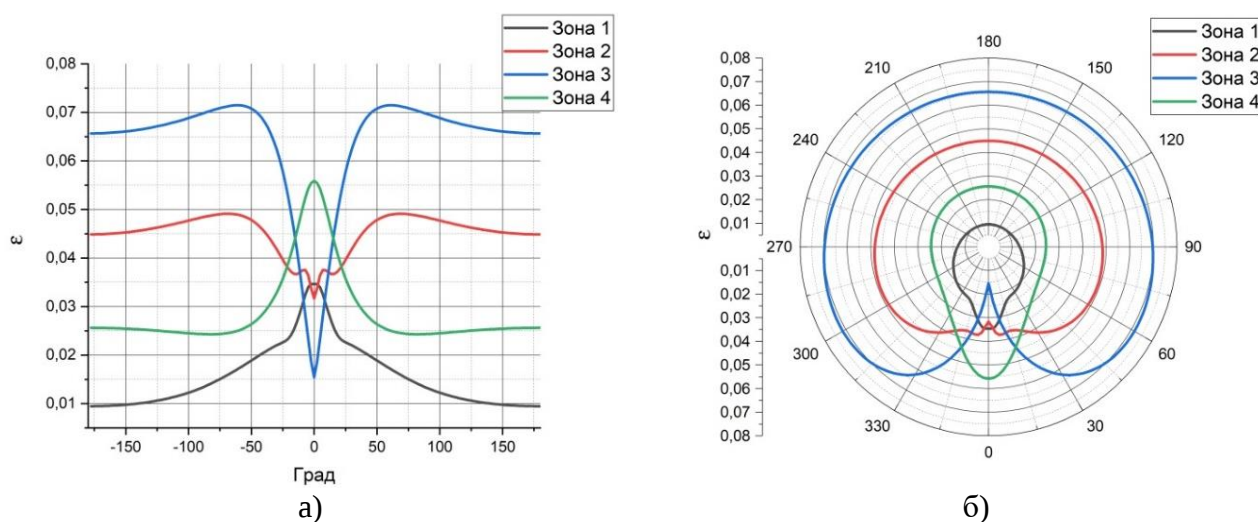


Рисунок 10 – Зони найбільших деформацій каркасу(а), де 1 – підбрєкерна, 2 – плечова, 3 – здвоєння каркасу, 4 – бортова зона; і цикли їх деформування (б)

Характер циклу було постульовано незмінним в межах кожної зони, проте амплітудні значення циклу визначались для кожного вузла розрахункової сітки окремо. Приклади побудованих циклів показано на рис.10 (б) у полярній системі координат, де нульовий промінь відповідає місцю контакту шини з дорогою.

На рис. 11 відображені цикли деформованого стану каркасу у контрольних зонах на різних режимах: номінальний (тиск – 210 кПа та вага автомобіля – 1 т.), перевантажений (тиск 210 кПа та вага – 2.5 т.), та інших (ненормативних). Аналіз показує, що максимальні значення деформацій у бортовій зоні при перевантаженні збільшуються у 1,5 рази, а у плечовій – у 2 рази. Крім того, у плечовій і підбрєкерній зоні цикли істотно змінюють характер.



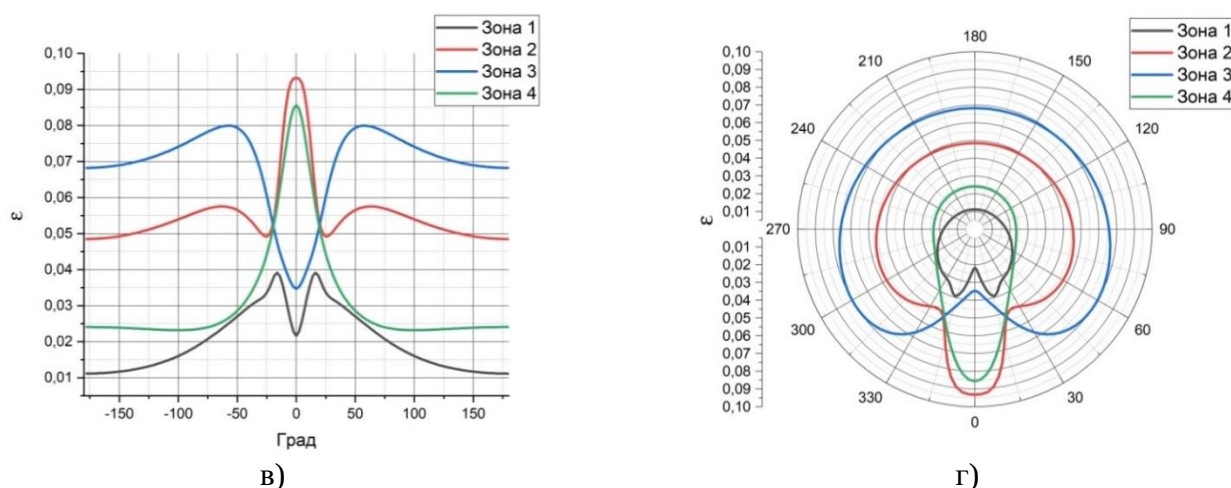


Рисунок 11 – Цикл деформованого стану каркасу для величини тиску 158 кПа та вертикального навантаження 0.75 т. (а,б), 3 т. (в, г); (а, в) – у декартовій, (б, г) – у полярній системі координат

Так при номінальному навантаженні мають місце два сплески з максимальними значеннями деформацій в області, що відповідає зміні контактної зони на безконтактну, а при перевантаженні – один виражений сплеск з максимальними значеннями деформацій у зоні контакту.

Усі знайдені цикли було розкладено в ряди Фур'є (3) та (6). При цьому період циклу визначався в залежності від лінійної швидкості руху колеса. В рядах зберігалось лише три члени, які вибирались адаптивно для збереження необхідної збіжності. Значення коефіцієнтів ряду уточнювались мінімізацією інтегральної похибки апроксимації.

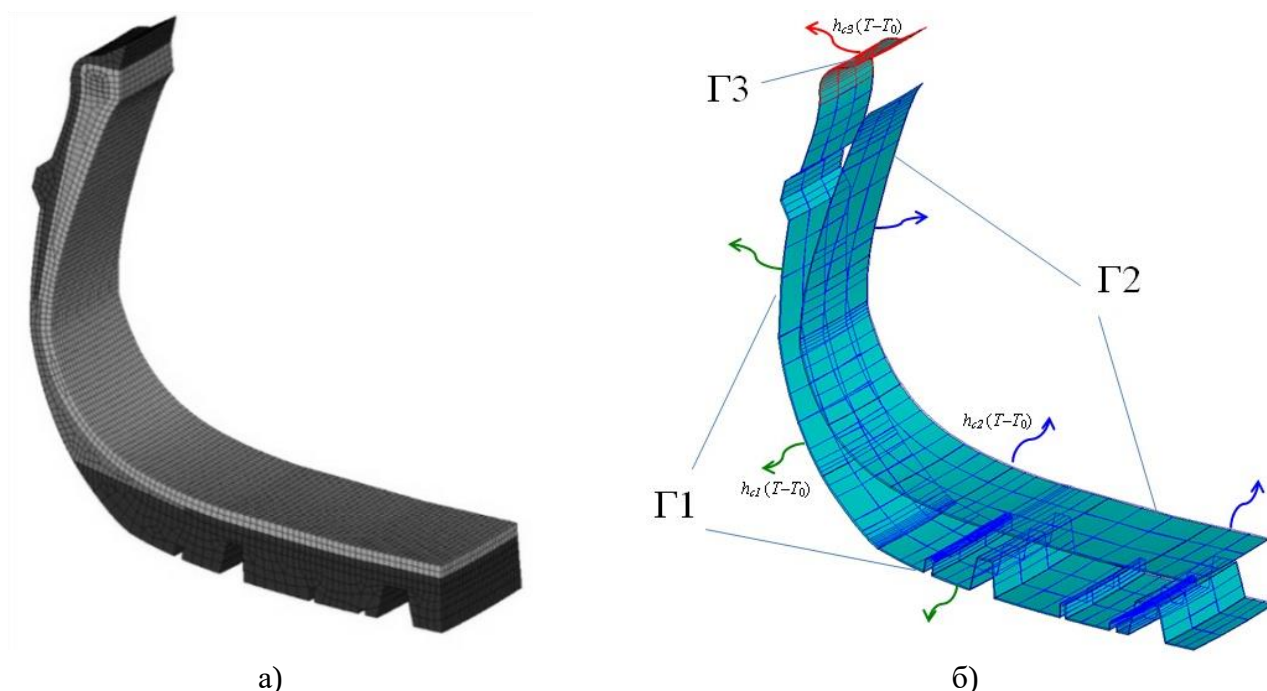


Рисунок 12 – СЕ – модель (а) та граничні умови для задачі теплопровідності(б)

Для кожного циклу деформування кожної зони та типу навантаження було обчислено площу петлі гістерезису в аналітичному вигляді (7), що масштабувалась значеннями амплітуд деформації у конкретному вузлі. Це дозволило для кожного експлуатаційного режиму визначити поле потужності тепловиділення при

циклічному деформуванні. Наступним кроком було розв'язання задачі теплопровідності. СЕ модель, побудована для вирішення даної задачі приведена на рис. 12 (а). На рис. 12 (б) проілюстровані поверхні з різними граничними умовами. В якості граничних умов на зовнішній (Г2), внутрішній (Г3) поверхні і місці взаємодії з диском (Г3) задається температура (T_0 , $^{\circ}\text{C}$) і коефіцієнт конвективного теплообміну (h_c , $\text{Вт/м}^2\text{C}^{\circ}$). Таким чином на поверхні Г1: $T_0 = 25$, $h_{c1} = 16,18$; Г2: $T_0 = 25$, $h_{c2} = 5,9$; Г3: $T_0 = 25$, $h_{c3} = 88000$;

В якості результатів отримуємо розподіли полів температури по шині за різний проміжок часу. Рис. 13 ілюструє розподіл тепла по шині, що рухається зі швидкістю 50 км/год, внутрішній тиск складає 210 кПа, вага автомобіля 1 т. та 2.5 тс. Найбільш нагрітою є зона каркасу. При малих рівнях вертикального навантаження більш високі значення температур спостерігаються у плечовій зоні каркасу – рис. 13, а), збільшення – переводить область високих температур у бортову зону (рис. 13, б). Також наявний абсолютний приріст температури на 40°C при збільшенні ваги до 2.5 т.

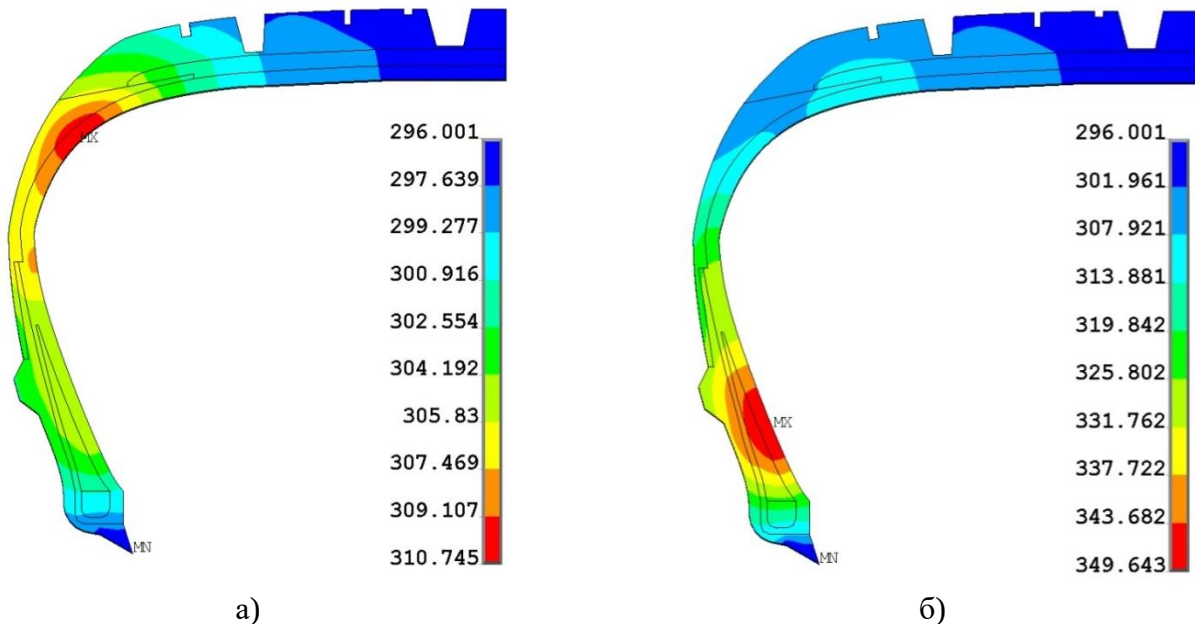


Рисунок 13 – Розподіл температурного поля по профілю шини під час її кочення зі швидкістю 50 км/год при величині внутрішнього тиску 210 кПа та розміром вертикального навантаження 1 т. (а), 2.5 т. (б).

На основі отриманих температурних розподілів вирішувалась задача дослідження Т-НС шини в експлуатації. Картин НДС (а) та Т-НС (б) представлені на рис. 14 для навантаження: тиском у 210 кПа та вагою 1 т. на швидкості 50 км/год. Порівняння Т-НС з результатами НДС шини, що були отримані без урахування впливу температурного поля показали, що для нормативного навантаження значення еквівалентних деформацій у контрольних зонах у каркасі збільшились на 15%, а їхня локація зміщується з бортової зони у плечову.

Для випадку перевантаження температурна складова збільшує деформації на 30 % в плечовій зоні, де концентруються максимальні деформації (без врахування температури зона максимуму була в бортовій, абсолютні максимум збільшився на 10 %).

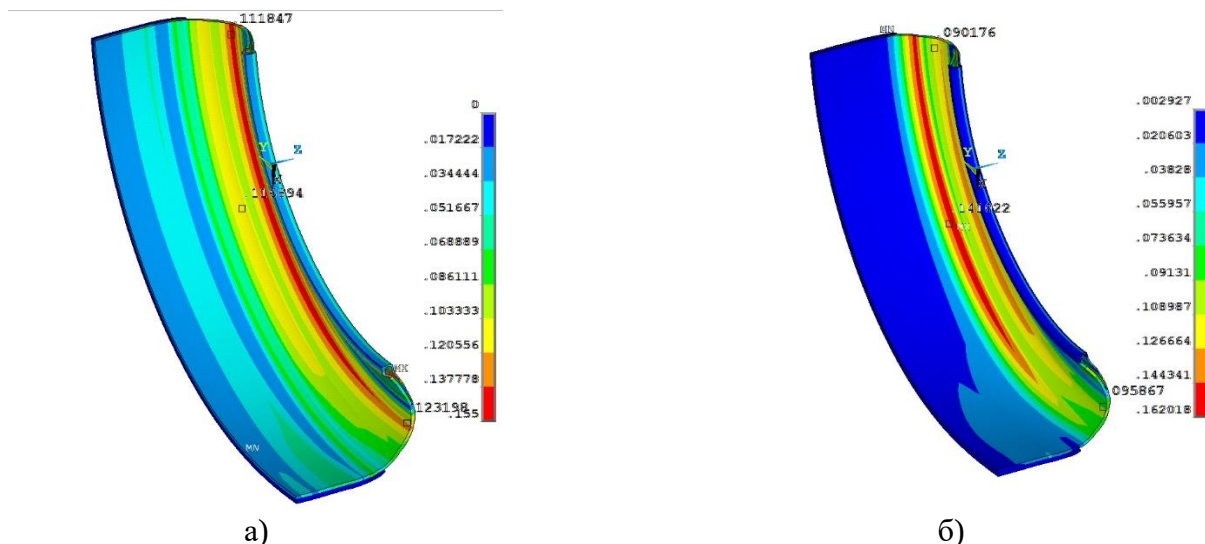


Рисунок 14– Деформації у кордних шарах шини: швидкість 50 км/год при величині внутрішнього тиску 210 кПа та розміром вертикального навантаження 1 т:

(а) – результат розрахунку НДС, (б) –Т-НС

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-практичну задачу – створення розрахункових підходів оцінки термо-напруженого стану (Т-НС) гумокордних композитів викликаного дисипативним самонагрівом при циклічному навантаженні, а також дослідження на їх основі теплових та деформівних процесів в елементах конструкцій в експлуатації, що в цілому спрямовано на оцінку їхньої надійності та довговічності. При цьому отримані такі основні результати:

1. На основі аналізу сучасного стану питань обґрунтовано важливість здійснення послідовно зв'язаної постановки вирішення задачі оцінки теплового та НДС в'язкопружних композитів при їхньому циклічному деформуванні з урахуванням розсіювання енергії та показано необхідність розробки удосконалених розрахункових підходів оцінки Т-НС відповідних елементів конструкцій в експлуатації, що визначило мету та задачі даного дисертаційного дослідження.

2. Запропоновано єдиний методологічний підхід до розрахункової оцінки Т-НС в'язкопружних гумокордних елементів конструкцій, який викликаний та супроводжується накопиченням тепла в наслідок розсіювання енергії під час циклічного деформування, що дозволяє визначити розподіл температурного поля в елементах конструкцій за складного експлуатаційного циклу навантаження.

3. Проведено комплекс натурних експериментальних випробувань з циклічного деформування композиту, який складається з гумової матриці посиленої односпрямованим текстильним кордним армуванням. За результатами виконаної серії експериментів встановлено, що:

- за циклічного деформування матеріалу, який досліджується, спостерігається суттєва амплітудна залежність модуля втрат та часу релаксації, зокрема модуль втрат зменшується на 60 %, а час релаксації збільшується на 25 % при збільшенні амплітуди деформації з 2% до 6%;

- визначено швидкість та рівень температури стабілізації самонагріву зразків

даних матеріалів в залежності від частоти та амплітуди циклічного деформування. Так для навантаження 2% з частотою 5 Гц – час нагріву зразків до рівня температурної стабілізації склав 200 с. з температурою на рівні 38 °С, для навантаження 4% з частотою 10 Гц нагрів тривав до 150 с., а температура встановилась на рівні 130 °С.

4. Було розроблено експериментально-розрахунковий метод для визначення в'язкопружних характеристик гумокордних композитів на основі мінімізації похибки обчислення температури самонагріву зразків за їхнього циклічного деформування методом стохастичної оптимізації. Застосування даного підходу дозволило ідентифікувати параметри в'язкопружності з похибкою по визначенню температури самонагріву в межах 2 %, а порівняння визначених площ петель гістерезису показало їхню задовільну збіжність в межах 10 % (для амплітуд навантаження до 4 % та частот до 10 Гц), та точність до 35% для більшої інтенсивності навантаження.

5. Вирішено прикладні задачі розрахунку термо-НДС пневматичної шини на основі розробленого в роботі розрахункового підходу та встановлених експериментальних залежностей, при цьому:

- розроблено ряд зв'язаних тривимірних моделей пневматичної шини на основі МСЕ, які дозволяють визначити її Т-НС, що сформується в експлуатації. Зокрема розроблені ієрархічний ряд моделей структурного типу та модель сектору для обчислення розподілу температурного поля на основі характеристик теплогенерації шляхом інтеграції даних по циклам деформацій.

- встановлено, що в пневматичній шині формується 4 типи циклів деформування в експлуатації для її різних структурних зон. Визначено закономірності зміни даних циклів в залежності від рівнів навантаження. Так, для нормативних рівнів найбільші значення деформацій спостерігаються в плечовій зоні та максимальні значення температури встановлюються на рівні 40 °С, для випадку перенавантаження 72 °С, а у випадку ненормативної експлуатації 117 °С.

- досліджено вплив теплового поля на НДС пневматичної шини, визначено, що температурне поле збільшує максимальні еквівалентні деформації та зміщує максимум у плечову зону. При цьому деформації у ній збільшуються на 15 % та 30 % для нормативного та перевантаженого режимів відповідно.

6. Розроблено рекомендації, що було впроваджено в практику проектування нових конструкцій пневматичних шин (підтверджується відповідним актом – «Росава Тайерс», м. Біла Церква).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Петрова Ю.А. (Вязовиченко) Применение двухмасштабного подхода к моделированию пневматических шин. / Ю.А. Петрова, В.П. Матейчик, О.О. Ларін // – Севастополь: СевНТУ. — 2013. — № 143. — С. 118-121.

Здобувачем здійснено багатомасштабне тривимірне скінченно-елементне моделювання пневматичної шини з урахуванням криволінійної геометрії, та контролем розмірності СЕ сітки.

2. Петрова Ю.А. (Вязовиченко) Визначення циклів напружень елементів пневматичної шини з використанням процедури субмоделювання / О.О. Ларін, Ю.А. Петрова // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ», 2014. – № 57(1099). – С.37-49.

Здобувачем, реалізовано підхід субмоделювання, проведено розрахунок НДС шини та з використанням уточнених значень побудовані цикли напружень і деформацій, що формуються під час її кочення.

3. Петрова Ю.А. (Вязовиченко) Аналіз надійності і прогнозування ресурсу втоми пневматичної шини з використання двомасштабного субмоделювання / О.О. Ларін, Ю.А. Петрова // Вісник «Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка». — Харків: ХНТУСГ ім. Петра Василенка, 2015. — № 163. — С.31-38.

Здобувачем, на основі двомасштабного субмоделювання проведено аналіз надійності і визначено ресурс шини.

4. Петрова Ю.А. (Вязовиченко) 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.

Здобувачем змодельовано контактну взаємодію шини з твердою основою.

5. Петрова Ю.А. (Вязовиченко) Дослідження процесу формування теплового стану в елементах пневматичної шини під час її циклічного деформування / Ю.А. Петрова, О.О. Ларін // Вібтрації в техніці та технологіях. – Вінниця, 2016. – №1(81). – С. 42-49.

Здобувачем визначено функції теплогенерації у шині на основі циклів її деформування і проведено розрахунок теплового стану шини на основі побудованих СЕ моделей.

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

Здобувачем проведено обробку експериментальних даних з визначення пружних та в'язкопружних характеристик еластовимірних текстильно армованих композитів.

7. Вязовиченко Ю. Дослідження процесу формування теплового стану в елементах пневматичної шини під час її циклічного деформування / О. Ларін, Ю. Вязовиченко // Праці Одеського політехнічного університету. – Одеса, 2017. – Вип. 2(52). – С. 3-9.

Здобувачем побудовано СЕ модель зразка гумокордного композиту та проведено чисельний розрахунок теплових процесів у ньому.

8. Viazovychenko Yu Experimental investigation of viscoelastic characteristics of rubber-cord composites considering the process of their self-heating / M. Itskov, O.Larin, Yu. Viazovychenko // Strength of Materials. – Springer, 2018. – Vol. 50. – Issue 6. – Pp 841-851. (SCOPUS)

Здобувачем самостійно отримано експериментальні дані з в'язкопружних та температурних характеристик гумокордного композиту.

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

Здобувачем проведено обробку експериментальних даних отриманих науковим керівником з визначення ортотропних характеристик гумокордних композитів.

10. Petrova Yu. (Viazovychenko) Two-scale approach to modelling of pneumatic tyres / O. Larin, V. Mateichyk, Yu. Petrova // Systems and means of motor transport. Selected problems. —. Seria: Transport. — Rzeszow: Politechnika Pzeszowska Im. Ignacego Lukaszewicza, 2013. — N 4. — Pp. 123-128.

Здобувачем, реалізовано багатомасштабний підхід, проведено розрахунок НДС шини.

11. Viazovychenko Yu Stochastic optimization algorithms for data processing in experimental self-heating process / O. Larin, Yu. Viazovychenko // Integrated computer technologies in mechanical engineering: ICTM 2020. Lecture Notes in Networks and Systems. — Springer, 2020. — Vol. 188. — Pp. 644-653. (SCOPUS)

Здобувачем застосовано чисельно-розрахунковий підхід з використанням оптимізаційного алгоритму для обробки експериментальних даних із визначення характеристик тепловиділення у гумокордному матеріалі при циклічному навантаженні.

12. Петрова Ю.А. (Вязовиченко) Исследование взаимного влияния НДС и теплогенерации в элементах пневматических шин при взаимодействии с дорожным покрытием / О.О. Ларін, Ю.А. Петрова // Тези доповідей XXIII Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я», 20-22 травня 2015 р. Харків, 2015 - Ч. 1.- С. 52.

Здобувачем побудовано СЕ моделі шини для розрахунку НДС та вирішення задачі теплопровідності, проведено відповідні розрахунки.

13. Петрова Ю.А. (Вязовиченко) Дослідження процесу теплогенерації в елементах пневматичних шин під час її циклічного деформування / О.О. Ларін, Ю.А. Петрова // Тези доповідей XII Міжнародного симпозіум українських інженерів механіків у Львові, 28-29 травня 2015р. — Львів: КІНПАТРІ ЛТД, 2015.— С. 155-156.

Здобувачем побудовано СЕ модель шини та проведено чисельний розрахунок її теплового стану.

14. Петрова Ю.А. (Вязовиченко) Исследование процесса формирования теплового состояния в элементах пневматической шины во время её циклического деформирования / О.О. Ларін, Ю.А. Петрова // Тези доповідей 14-ї Міжнародної науково-технічної конференції «Вібрації в техніці та технологіях», 21-25 вересня 2015р. — Дніпропетровськ, 2015. — С. 34-35.

Здобувачем визначено функції теплогенерації у шині на основі циклів її деформування і проведено розрахунок теплового стану шини.

15. Петрова Ю.А. (Вязовиченко) Оцінка пружних експлуатаційних характеристик пневматичних шин в залежності від рівня навантаження / Ларін О.О., Петрова Ю.А. // Тези доповідей XXIV Міжнародної науково-практичної

конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я», 18-20 травня 2016 р. Харків, 2016- Ч. 1.- С. 62.

Здобувачем побудовано СЕ моделі шини та проведено варіантні розрахунки НДС шини при різних рівнях навантаження.

16. Петрова Ю.А. (Вязовиченко) Разработка алгоритма численного моделирования процессов теплообразования в конструкциях с эластомерными композитными материалами / Ю.А. Петрова // «Современные проблемы естественных наук – Тараповские чтения»; тези доповідей міжнародної конференції, 1-15 березня 2016 р., 2016. – Ч. 1, С. 36.

17. Petrova Yu (Viazovychenko) A simulation of the transient self-heating process in dynamically loaded rubber-based multilayers reinforced composites / O. Larin, Yu. Petrova // Proceedings of 5th Int. Conference “Nonlinear dynamics - 2016” 27-30 September 2016. – Kharkiv: NTU KhPI, 2016. – Pp. 370-376.

Здобувачем побудовано СЕ модель шини та проведено чисельний розрахунок перехідних теплових процесів.

18. Вязовиченко Ю.А. Дослідження процесу формування теплового стану в елементах пневматичної шини під час її циклічного деформування / Ю.А. Вязовиченко, О.О. Ларін // Актуальні проблеми інженерної механіки; тези доповідей IV Міжнародної науково-практичної конференції, 16-19 травня 2017 р. – Одеса: ОДАБА, 2017. – С. 222-223.

Здобувачем побудовано СЕ модель зразка гумокордного композиту та проведено чисельний розрахунок теплових процесів у ньому.

19. Viazovychenko Yu Soft computing methodology for digital processing of transient signal of the thermos-mechanical response of elastomeric composites self-heating / O. Larin, Yu. Viazovychenko // IX International conference on optoelectronic information technologies “PHOTONICS-ODS 2020”, 5-7 October 2020 – Vinnytsia: VNTU, 2020. – Pp. 104

Здобувачем застосовано чисельно-розрахунковий підхід з використанням оптимізаційного алгоритму для обробки експериментальних даних.

АНОТАЦІЇ

Вязовиченко Ю.А. Термо-напружений стан в'язкопружних гумокордних елементів конструкцій з урахуванням розсіювання енергії при циклічному деформуванні. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2021.

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню актуальної науковоприкладної задачі, що полягає у розробці розрахункових підходів вивчення закономірностей протікання теплових процесів у гумокордних композитних елементах конструкцій, що супроводжують роботу елементів з в'язкопружних матеріалів, та оцінки їх впливу на термо-напружений стан.

Підхід базується на методу скінченних елементів та послідовному вирішенні задачі циклічного деформування конструкції в експлуатації при різних рівнях

навантаження та її теплового стану. Проведено експериментальні дослідження в'язкопружних характеристик та показників тепловиділення однонаправленого гумокордного композиту. Вирішено прикладну практичну задачу розрахунку термо-напруженого стану пневматичної шини в експлуатації, виявлено ступінь впливу наявного температурного поля на НДС конструкції.

Ключові слова: гумокорди, термо-напружений стан, циклічне деформування, в'язкопружність, розсіювання енергії, самонагрів, пневматична шина.

Вязовиченко Ю.А. Термо-напряженное состояние вязкоупругих резинокордных элементов конструкций с учетом рассеяния энергии при циклическом деформировании. - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.09 - динамика и прочность машин. - Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2021.

Диссертация посвящена решению актуальной научно-прикладной задачи, которая заключается в разработке расчетных подходов изучения закономерностей протекания тепловых процессов, сопровождающих работу элементов из вязкоупругих материалов, и оценки их влияния на термо-напряженное состояние элементов конструкций.

Подход базируется на методе конечных элементов и последовательном решении задачи циклического деформирования конструкции в эксплуатации при разных уровнях нагружения и её теплового состояния. Проведены экспериментальные исследования по определению вязкоупругих характеристик и показателей теплообразования однонаправленного резинокордного композита. Решена прикладная практическая задача расчета термо-напряженного состояния пневматической шины в эксплуатации, выявлена степень влияния имеющегося температурного поля на НДС конструкции.

Ключевые слова: резинокорд, термо-напряженное состояние, деформационный цикл, вязкоупругость, рассеивание энергии, эксперимент.

Vyazovichenko Yu.A. Thermo-stress state of viscoelastic rubber-cord elements of structures taking into account energy dissipation during cyclic deformation. - Manuscript.

Thesis is presented for Scientific Degree Candidate of Technical Sciences, speciality 05.02.09 – Dynamics and Strength of Machines. – National Technical University, «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, 2021.

The thesis deals with a solution to the applied problem of the development of computational approaches to study the peculiarities of thermal and deformation processes that accompany the work of viscoelastic materials in mechanical engineering elements with reinforced rubber composites.

The object of research is the processes of formation of the thermo-stress state in rubber-cord elements of mechanical engineering elements operating in the conditions of cyclic deformation taking into account energy dissipation.

The main theoretical statements of the dissertation are formulated in the framework of the fundamental of the theories of elasticity and viscoelasticity, thermal conductivity

and thermoelasticity. The assessment of cycling deformed and stressed states have been carried out within the framework of 3d computer modelling tools using the finite element method (FEM). A multi-layer structure of composite elements is modelled explicitly.

A unified methodological approach is proposed to the computational modelling of thermo-stress state, which is caused and accompanied by heat accumulation due to energy dissipation during cyclic deformation of viscoelastic rubber-cord elements of mechanical engineering structures. The approach allows to determine inhomogeneous temperature field distribution in structural elements caused by operational load cycles, as well as the impact of these thermal processes on the stressed and deformed states of structures.

A set of experimental tests on cyclic deformation of the unidirectional textile reinforced rubbery composites have been done. INSTRON ElectroPuls E3000 Test System was used. Viscoelastic characteristics of this material and the heat generation indicators required for the application of the computational approach in applications have been experimentally found. Significant amplitude dependence of the storage modulus and relaxation time is observed during cyclic deformation of the material under study. A level of temperature rate and value of self-heating depending on the frequency and amplitude of cyclic deformation of the materials is determined.

A specific procedure and software for the identification of the viscoelastic and dissipative material parameters based on computational modelling of the temperature state of cyclically deformed specimens and experimental observations are developed. The procedure is seeking the material parameters through the minimization of the error of the difference of simulated and experimentally observed self-heating temperature by the method of stochastic optimization. The application of this approach allowed to identify the viscosity parameters material parameters. Based on the results, a critical comparison of an volume of energy released in hysteresis loops that theoretically calculated from the model with identified from self-heating temperature data under different load conditions to independent experimental measurements showed their satisfactory convergence and justified the main methodological hypothesis of the current work.

The applied engineering problem of calculation of the thermo-deformed state of a pneumatic tire on the basis of the developed in the research computational approach and found experimental data are solved. A number of three-dimensional FE models of pneumatic tires has been created, which allow to determine its thermal and stressed states that formed in operation. The models have been created in 3d statement considering multilayer structure, curvilinear orthotropic properties, geometric and physical nonlinearity within the submodeling approach.

A deformed state of pneumatic tires has been carried out depends on the different load conditions as well as on the temperature field that is generated. The influence of the thermal field on the deformed state of a pneumatic tire is investigated.

The results obtained in the dissertation are implemented in the practice of designing, research and development work of JSC "ROSAVA TIRERS" (tire engineering and manufacturing company), and into the educational process of NTU "KhPI".

Keywords: rubber-cord, thermo-stress state, deformation cycle, viscoelasticity, energy dissipation, self-heating, tires.



*Підписано до друку 06 квітня 2021р.
Формат 60 x 84 1/16. Папір офсетний.
Друк-цифровий. Умовн. друк. арк. 0,9. Тираж 100 прим.
Зам. № 0704202101*

*Надруковано у копії-центрі «МОДЕЛІСТ»
(ФО-П Миронов М.В., Свідоцтво ВО4№022953)
м. Харків, вул. Мистецтв, 3 літер Б-1
Тел. +38-067-91-93-922
www.modelist.in.ua*