

**ВІДГУК**  
**офіційного опонента**

на дисертаційну роботу Вязовиченко Юлії Андріївни  
**"Термо-напружений стан в'язкопружних гумокордних елементів конструкцій  
з урахуванням розсіювання енергії при циклічному деформуванні",**  
представлену на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук  
за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин

**Актуальність теми дисертаційної роботи.** Гумокордові композитні матеріали, які складаються із полімерних гомогенних і гетерогенних шарів з кордним підсиленням, широко використовуються при виготовленні авіаційних та автомобільних шин, а також у якості пасивних дисипативних елементів конструкцій, працюючих за умов інтенсивних динамічних навантажень. Практика використання гумокордових композитів вказує на їх чіткий прояв в'язкопружних властивостей. Вони також характеризуються високим рівнем розсіювання енергії в матеріалі, що дозволяє підвищити комфортність і безпеку транспортних засобів. Але у той же час, воно, як відомо, при інтенсивних динамічних навантаженнях обумовлює суттєвий саморозігрів гумокордових конструктивних елементів, що значно впливає на їх функціональну роботоздатність та ресурс. Гетерогенність внутрішньої структури таких конструктивних елементів, які працюють в умовах складного напруженого стану, обумовлює неоднорідність розподілу тепла по їх об'єму, створюючи при цьому додаткові області термонапруженості. Цей перерозподіл при ненормативних режимах експлуатації пневматичних шин може суттєво вплинути на їх міцність внаслідок підвищення рівня термонапруженості та спричинити переміщення області концентрації напружень в більш небезпечні зони. Тому виникає проблема у визначенні таких зон, які характеризуються інтенсивним поглинанням пружної енергії деформацій та відповідним саморозігрівом, при динамічних навантаженнях. Складність геометрії та умов експлуатації гумокордових елементів пневматичних шин обумовлює необхідність розв'язання тривимірної задачі у геометрично і фізично нелінійній постановці. Її вирішення пов'язане зі значними обчислюваними труднощами, для вирішення яких виникає необхідність розробки методів підвищення збіжності результатів розрахунку. У той же час, урахування розсіювання енергії як основного чинника теплоутворення у гумокордних композитах повинно базуватись на фізично-обґрунтованих підходах, оснований на безпосередньому використанні результатів експериментальних досліджень розсіювання енергії в матеріалах. Саме такий підхід до врахування розсіювання енергії покладено в основу представленої дисертаційної роботи, мета якої полягає у розробці розрахунково-експериментальної методики визначення термонапруженості в'язкопружних гумокордних елементів конструкцій, працюючих при нестационарних циклічних навантаженнях. Оскільки аналіз термонапруженості таких об'єктів транспортного

машинобудування є основним чинником, який забезпечує їх безпечну функціональну роботоздатність, актуальність теми представленої дисертаційної роботи не викликає сумнівів.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Актуальність теми роботи підтверджується також тим, що її виконання відбувалося в рамках програми дослідницького гранту ЄС «INNOPIPES», відповідно до завдань Міжнародного науково-дослідного проєкту «Innovative Non-Destructive Testing and Advanced Composite Repair of Pipelines with Volumetric Surface Defects» (Contr. № PIRSES-GA-2012-318874) та держбюджетної науково-дослідної роботи «Розробка методів математичного моделювання поведінки нових та композиційних матеріалів для оцінки ресурсу та прогнозування надійності елементів конструкцій» (ДР № 0117U004969), що виконувалася в Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" за планом досліджень Міністерства освіти і науки України.

**Оцінка змісту роботи, обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій.** Дисертаційна робота Ю.А. Вязовиченко складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних наукових джерел із 110 найменувань і 2 Додатків. Загальний обсяг дисертації становить 148 сторінок, у тому числі 72 рисунки та 15 таблиць.

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми і мету дисертаційної роботи, наведено перелік задач, наведено перелік задач, які необхідно розв'язати для досягнення поставленої мети, визначено об'єкт і предмет дослідження, сформульовано наукову новизну та практичну значимість одержаних результатів, представлено дані про їх апробацію та подано список публікацій авторки роботи і зазначено її особистий внесок у результати наукових робіт, які опубліковано у співавторстві.

*Перший розділ* присвячено опису об'єкта вивчення та сучасних підходів до моделювання пружних та в'язкопружних властивостей матеріалів гумокордних елементів конструкцій. Представлено результати огляду відомих з науково-технічної літератури досліджень з розрахункового та експериментального визначення дисипативного саморозігріву гумокордових елементів конструкцій. Визначено вплив температури на пружні і дисипативні властивості матеріалів гумокордів та на характеристики міцності у елементах конструкцій. На підставі виконаного аналізу зроблено висновок про необхідність подальшого розрахунково-експериментального дослідження зв'язаних деформаційних та теплових процесів у в'язкопружних гумокордних композитах з урахуванням розсіювання енергії при їх циклічному деформуванні, що і сформувало мету дослідження, яка полягає у встановленні закономірностей протікання цих процесів в елементах конструкцій при їх експлуатації.

У *другому розділі* представлено загальну методику розрахунково-експериментального дослідження напруженого та термонапруженого станів

гумокордних елементів конструкцій. Вона полягає у послідовному чисельному визначенні статичного НДС конструкції, схематизації циклів її динамічного навантаження, ідентифікації за експериментальними даними характеристик розсіювання енергії в матеріалі і розподілу джерел тепла. Результати послідовного розв'язання зазначених етапів використовуються для подальшого визначення термонапруженого стану конструкцій. Для реалізації кожного етапу методики представлено варіаційну постановку незв'язаної задачі статичної та нестационарної теплопровідності та їх скінченноелементу реалізацію. Далі описано узагальнену лінійну модель в'язкопружного тіла та теоретичні основи розв'язання нелінійних рівнянь статичної з урахуванням контакту поверхонь.

У *третьому* розділі представлено методику проведення експериментальних досліджень з визначення характеристик розсіювання енергії та температури саморозігріву зразків гумокорду для різних амплітуд і частот їх циклічного деформування вздовж та поперек волокон. За результатами проведених експериментальних досліджень було одержано петлі гістерезису. Показано, що при частоті 5 Гц циклічного деформування зразків вздовж волокон з амплітудою 2% форма петлі близька до еліптичної, що характерно для в'язкопружного матеріалу в лінійній області деформування. При збільшенні частоти і амплітуди деформацій спостерігається їх значний вплив на форму і площу петлі гістерезису. Для одержаних залежностей було побудовано апроксимаційні криві залежності площі петлі гістерезису залежно від частоти навантаження з урахуванням температури саморозігрівання матеріалу. Для цього використано узагальнену лінійну модель в'язкопружного матеріалу. Її параметри було визначено для фіксованого значення амплітуди циклічного деформування шляхом обробки експериментальних даних. Для пошуку параметрів моделі, які б задовольняли критерію мінімального середньоквадратичного відхилення температури усталеного режиму самонагрівання, було використано методи глобальної оптимізації. Достовірність визначених у такий спосіб параметрів моделі в'язкопружного матеріалу підтверджено добрим співпадінням результатів чисельного моделювання з одержаними раніше даними експерименту. Так, точність визначення площ петель гістерезису для зразків, циклічно деформованих з амплітудою менше 6% вздовж волокон, не перевищує 20%, і 37% – поперек волокон. У той же час, похибка визначення температури нагріву не перевищує 3,5%, що є свідченням коректності моделі саморозігріву, розрахунку і експерименту.

Результати досліджень з визначення впливу температури саморозігріву та експлуатаційних параметрів на напружено-деформівний та термонапружений стани пневматичної шини розглядаються у *четвертому* розділі роботи. Її модель складалася з трьох дрібніших підмоделей, що дозволимо підвищити збіжність результатів і визначити експлуатаційні цикли деформування для різних структурних зон шини. За результати проведених розрахунково-експеримен-

тальних досліджень встановлено, що при врахуванні термонапруженого стану шини за нормативних умов її експлуатації, значення еквівалентних деформацій у контрольних зонах каркасу збільшуються на 15%. При цьому їх локалізація зміщується з бортової зони у плечову. При перевантаженні у 2,5 раз від нормативного, температурні деформації у плечовій зоні збільшились на 30%.

**Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій.** Одержані результати є оригінальними і належать здобувачці. Обґрунтованість і достовірність основних результатів, наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечується використанням сучасних методологічно повірених експериментальних засобів, чисельних методів і сучасних програмних комплексів.

**Наукова новизна результатів, одержаних у дисертаційній роботі.**

1. Проведено комплекс експериментальних досліджень з визначення характеристик розсіювання енергії і температури саморозігріву зразків із гумокордового композиту вздовж і поперек напрямку його армування при одночасному розтягу з циклічним деформуванням для різних значень амплітуди деформації і частоти навантаження.

2. За результатом проведених експериментальних досліджень одержано петлі гістерезису для різних значень частоти і амплітуди циклічного деформування. Встановлено, що за умов усталеної температури форма і площа петлі гістерезису утворена при деформуванні зразків значно залежать від амплітуди і частоти циклічного деформування.

3. Розроблено комплексний метод розрахунково-експериментального визначення термонапруженого стану гумокордових елементів з урахуванням криволінійної циліндричної ортотропії їх механічних властивостей та внутрішнього розсіювання енергії при циклічному деформуванні.

4. Подальшого розвитку набули розрахункові методи визначення термонапруженого стану пневматичних шин в яких було враховано складний цикл деформування при експлуатації та розсіювання енергії в матеріалах. З їх використанням встановлено вплив умов експлуатації шини на рівень її термонапруженості.

**Практична цінність одержаних у роботі результатів** полягає у створенні послідовної, обґрунтованої розрахунково-експериментальної методики аналізу впливу конструктивних та експлуатаційних факторів на напружено-деформівний та термонапружений стан пневматичних шин, яка може використовуватися при оцінці надійності таких конструктивних елементів та застосовуватися в практиці модернізації їх структури та проектуванні нових виробів. Так результати дисертаційної роботи вже отримали запровадження у практику проектно-дослідних робіт в ТОВ «РОСАВА ТАЙЕРС» (м. Київ).

Запропоновані у роботі методи до тривимірного моделювання використовуються у навчальному процесі на кафедрі динаміки та міцності машин

НТУ «ХПІ» при підготовці здобувачів вищої освіти за освітньою програмою бакалавр та освітньо-науковою програмою магістр.

**Апробація результатів дослідження.** Основні наукові положення, висновки і результати дисертаційної роботи у достатній мірі висвітлені в опублікованих 19 наукових працях. Із них – 7 статей у фахових виданнях України, 4 статті у закордонних виданнях, 2 з яких індексуються у міжнародних наукометричних базах Scopus та Web of Science, та 8 тез доповідей. Матеріали дисертаційної роботи апробовані на 8-ми різних міжнародних наукових конференціях. У повному обсязі робота доповідалась на розширеному науковому семінарі кафедри динаміки та міцності машин НТУ «Харківський політехнічний інститут». Автореферат з достатньою повнотою відображає зміст дисертації.

### **Основні зауваження до дисертаційної роботи.**

1. Слід відзначити деяку обмеженість огляду досліджень. Бажано було б більше уваги приділити огляду методів термов'язкопружності та механіки багатошарових оболонок. Відсутність такого аналізу робить незрозумілим те, чим обумовлена постановка незв'язаної задачі термопружності та приведене у другому розділі її варіаційне формулювання для ідеально пружного матеріалу.

2. Об'єкти вивчення представленої роботи мають композитну структуру і характеризуються ортотропією їх механічних властивостей. Однак застосовані методи визначення пружних сталих гумокордового композита у тексті роботи не знайшли відображення. Тому не зовсім зрозуміло, як маючи експериментально одержані пружні та дисипативні характеристики матеріалу зразка вздовж і поперек напрямку його армування було визначено всі інші пружні сталі матеріалу та відповідні модулі втрат.

3. Петлі гістерезису, експериментально одержані при частоті циклічного навантаження більше 5 Гц і амплітуді деформації більше 4%, мають чітко виражений нелінійний вигляд. У такому разі характеристики розсіювання енергії можуть визначатися як площею, так і формою петлі механічного гістерезису, що також виключає можливість застосування концепції комплексного модуля. Тому у роботі бажано було б чітко сформулювати обмеження представленої методики, зокрема, для яких допустимих значень швидкості руху пневматичної шини і навантаження можуть бути отримати достовірні результати з визначення її термонапруженого стану.

4. Слід відзначити, що ні площа петлі гістерезису, ні модуль втрат не можуть бути використані у якості характеристики розсіювання енергії. Згідно зі стандартизованою термінологією теорії механічних коливань, такою характеристикою є коефіцієнт поглинання, який визначається як відношення енергії, розсіяної за один період коливань системи (площі петлі гістерезису), до максимальної потенціальної енергії системи.

5. Результати визначення параметрів розсіювання енергії у зразках із гумо-кордового композиту при одновісному розтягу вздовж і поперек напрямку їх армування було застосовано для визначення термонапруженого стану пневматичних шин. Однак у роботі не проаналізовано вплив складного напруженого стану та нестационарного навантаження, які характерні для таких конструктивних елементів, на визначені параметри розсіювання енергії в матеріалі та відповідну температуру його розігріву.

6. На жаль, в тексті роботи не вдалося уникнути граматичних помилок та деяких редакційних неузгодженостей. Так, зокрема, рис. 4.16 повторює зміст рис. 4.3; найменування температури в тексті приведено як в кельвінах, так і в градусах Цельсія; позначення оператора транспонування та похідної за часом у другому розділі роботи не узгоджені.

**Висновок.** На основі вивчення змісту дисертаційної роботи, автореферату і публікацій вважаю, що дисертаційна робота Вязовиченко Юлії Андріївни «Термонапружений стан в'язкопружних гумокордних елементів конструкцій з урахуванням розсіювання енергії при циклічному деформуванні» є завершеною науковою роботою, у якій поставлено та розв'язано актуальну науково-технічну задачу визначення термонапруженого стану в'язкопружних гумокордних елементів конструкцій за характеристиками розсіювання енергії їх циклічного деформування. За змістом та складністю вирішених завдань представлена робота відповідає рівню кандидатської дисертації та паспорту спеціальності 05.02.09 – динаміка та міцність машин. Наведені зауваження не знижують загальної позитивної оцінки дисертації та не зменшують її практичного значення.

Дисертаційна робота відповідає вимогам п.п. 9, 11 і 12 «Порядку присудження наукових ступенів» щодо кандидатських дисертацій, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567, а її авторка, Юлія Андріївна Вязовиченко, заслуговує на присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин.

Офіційний опонент

кандидат технічних наук,

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

О.Л. Деркач



*OL*  
27.04.2021