

У спеціалізовану раду
Д64.050.10
Національний технічний
університет
"Харківський політехнічний
інститут"

ВІДГУК

офіційного опонента

на дисертаційну роботу Ларіна Олексія Олександровича

«ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРОГНОЗУВАННЯ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ
МАШИН З ГУМО-КОРДНИМИ КОМПОЗИТАМИ ПРИ ВІДМОВАХ, ЩО
ВИКЛИКАНІ ВТОМОЮ», що подана на здобуття наукового ступеня доктора
технічних наук за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин

Актуальність теми. Одним з основних та актуальних завдань сучасного машинобудування є обґрунтування ресурсу відповідальних та високонавантажених елементів конструкцій (особливо, які виготовлені із композиційних матеріалів) на стадії їх проектування, а також прогнозування їх залишкового ресурсу в процесі експлуатації. Слід відзначити, що однією з найбільш поширених причин, що призводить до відмов у сучасних машинобудівних конструкціях є втомне навантаження (деформування) названих елементів машин та конструкцій.. Окреслені питання в повній мірі відносяться до елементів машин, що виготовлені із різних конструктивних матеріалів в тому числі і з еластомірних. При цьому слід зазначити, що розрахунок довговічності та надійності високонавантажених елементів конструкцій з еластомірними матеріалами, зокрема гумо-кордними композитами, за критеріями втоми є складною та комплексною проблемою, для розв'язування якої необхідно використовувати сучасні експериментально розрахункові підходи.

Для прогнозування ресурсу елементів конструкцій з гумо-кордними композитами на стадії їх проектування та залишкового ресурсу на стадії експлуатації необхідно мати відповідну модель накопичення мікропошкоджень, оскільки ця стадія руйнування для умов мало- (багато-) циклової втоми складає понад 80% загального терміну експлуатації. Для інженерних розрахунків

кінетики накопичення мікропошкоджень в залежності від основних параметрів експлуатаційного навантаження найбільш зручним є феноменологічний підхід. Існуючі моделі накопичення мікропошкоджень в рамках прогнозу ресурсу гумо-кордних елементів машин повинні бути удосконалені на випадок геометрично та фізично нелінійного деформування відповідних конструкцій, а також мають враховувати існуючий випадковий розкид експериментальних даних, щодо характеристик втомних названих матеріалів. Крім цього важливою проблемою є врахування впливу процесу старіння цих матеріалів на ресурс елементів машинобудівних конструкцій.

Виходячи з викладеного, розробка удосконалених ймовірнісних моделей накопичення втомних пошкоджень в гумових матеріалах та гумо-кордних композитах з урахуванням процесів старіння, а також створення нових розрахункових методів визначення показників надійності елементів машин на основі цих моделей є актуальною та важливою науково-прикладною проблемою, якій і присвячено дисертаційну роботу Ларіна О.О.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана відповідно до плану наукових досліджень, проведених на кафедрі динаміки та міцності машин Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» в рамках виконання здобувачем окремих розділів держбюджетних науково-дослідних робіт, зокрема: «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), а також в рамках Міжнародного науково-дослідного проекту 7-ї Рамкової програми Європейського Союзу «Innovative Non-Destructive Testing and Advanced Composite Repair of Pipelines with Volumetric Surface Defects».

Ступінь обґрунтованості й достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі. Представлені в роботі наукові положення та сформульовані висновки і рекомендації впливають із її змісту і постановки задач досліджень. Обґрунтованість і вірогідність наукових положень забезпечується коректним застосуванням методів механіки суцільного середовища, нелінійної теорії пружності, континуальної механіки пошкоджуваності, теорії ймовірності та математичної статистики, а також використанням сучасних розрахункових програмних комплексів на базі методу скінченних елементів.

Проведені в роботі дослідження базуються на критичному аналізі існуючих феноменологічних моделей втомної пошкоджуваності з метою розробки удосконаленої ймовірнісної моделі, яка дозволяє враховувати випадковість характеристик композиційного матеріалу, зокрема і їх зміну у часі внаслідок старіння, а також наявну експлуатаційну варіацію характеристик НДС, які призводять до втоми.

Висновки та рекомендації, що сформульовані в роботі виходять з критичного аналізу отриманих в дисертації результатів, є достатньо аргументованими.

Достовірність результатів досліджень забезпечується використанням сучасних ефективних методів моделювання фізично та геометрично нелінійних задач механіки твердого деформівного тіла, коректністю постановок математичних задач та відповідністю змісту теоретичних положень фізичній суті описуваних процесів. Важливим підтвердженням достовірності результатів є їх перевірка шляхом зіставлення розрахункових даних із результатами експериментальних тестових досліджень, які показують їх задовільну збіжність.

До основних нових наукових результатів дисертації слід віднести наступне:

1. Запропоновано нову ймовірнісну модель кінетики накопичення розсіяних втомних пошкоджень для конструкційних матеріалів, яка враховує особливості фізично та геометрично нелінійного деформування матеріалу, а

також вплив процесу старіння на швидкість накопичення пошкоджень.

2. Визначено зв'язок між характеристиками класичної кривої втоми та параметрами кінетичного рівняння накопичення втомних пошкоджень відповідно до запропонованої моделі, що надає параметрам кінетичного рівняння фізичного змісту та дозволяє отримати зручний засіб їх експериментальної ідентифікації для широкого класу еластомірних матеріалів.

3. Розроблено ефективний метод прогнозування ресурсу експлуатації відповідальних елементів конструкції, що заснований на запропонованих ймовірнісних моделях накопичення втомних пошкоджень та для умов стаціонарного випадкового експлуатаційного деформування елементів конструкцій.

4. Отримані аналітичні вирази для визначення одновимірної нестационарної щільності ймовірності пошкоджуваності втоми з урахуванням стохастичної деградації властивостей матеріалу для різних варіантів випадкового навантаження;

5. Отримані нові експериментальні дані (кількісні показники та якісні закономірності) щодо впливу процесів термічного старіння на характеристики опору втомі сучасних гумових та гумо-кордних матеріалів.

Значимість отриманих результатів для науки і практичного використання. Розроблені здобувачем математичні моделі, методи та підходи дають можливість визначати ресурс елементів машинобудівних конструкцій з гумовими та гумо-кордними матеріалами на етапі їх проектування та підчас експлуатації. Це є теоретичною основою для оцінки експлуатаційної надійності широкого класу машин та апаратів, що дозволяє попередити їх раптові відмови, обґрунтовано планувати проведення ремонтних робіт, графіки технічних оглядів, тощо.

В дисертаційній роботі вирішено серію практичних задач з оцінки міцності та надійності пневматичних шин автомобільного транспорту, гумо-кордних амортизаційних прокладок, тороїдальної компенсаторної муфти-коліна промислових трубопроводів. Запропоновано параметризовані

скінчено-елементі моделі даних елементів конструкцій, що надали можливість провести визначення особливостей формування показників НДС, функціональні характеристики та оцінити ресурс.

Результати наукових досліджень, що отримані в дисертаційній роботі впроваджено в практику проектно-дослідних робіт провідних вітчизняних підприємств машинобудівної галузі України, зокрема: ПАТ «РОСАВА» (м. Біла Церква, Київська обл.) та ПрАТ «ІнтерМікро Дельта, Інк» торгівельна марка «Дніпрошина» (м. Дніпро); на авто- та машинобудівному підприємстві ПАТ «АвтоКрАЗ» (м. Кременчук). Вони підтверджені актами впровадження та довідками про використання результатів роботи, які наведені в додатку у дисертації.

Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях. Результати дисертаційної роботи достатньо повно опубліковані у 49 наукових працях: 28 у наукових фахових виданнях України, 7 у закордонних фахових виданнях (4 – у виданнях, які входять до наукометричної бази SCOPUS), 1 Патент України на корисну модель, 1 – свідоцтво про авторське право на твір та 12 – у матеріалах міжнародних конференцій. 11 – наукових робіт опубліковано одноосібно.

У цілому, рівень і кількість публікацій та апробації матеріалів дисертації повністю відповідають вимогам МОН України.

Загальна характеристика роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, семи розділів, висновків, списку використаних джерел інформації та додатків. Повний обсяг дисертації складає 363 сторінки, у тому числі основного тексту дисертації 290 сторінок (зокрема 19 рисунків на 12 окремих сторінках), список використаних джерел з 399 найменувань на 44 сторінках, 6 додатків на 29 сторінках.

У вступі обґрунтовано актуальність теми роботи, сформульовано наукову новизну й практичну цінність отриманих результатів, об'єкт, предмет та методи дослідження, надані узагальнені відомості щодо кількості публікацій та широту апробації результатів роботи.

У першому розділі представлено критичний аналіз сучасного стану

проблеми, якій присвячено дисертаційне дослідження. Наведено опис конструктивних особливостей та умов експлуатації, характерні причини відмов типових гумових та гумо-кордних елементів в сучасних машинобудівних конструкціях.

Представлено аналіз існуючих моделей та закономірності накопичення багатоциклової втоми в матеріалах при циклічному деформуванні, а також підходи до прогнозування надійності та визначення ресурсу елементів машинобудівних конструкцій.

Представлений аналіз сучасного стану названої наукової проблеми та зроблені висновки дозволили сформулювати мету даної дисертаційної роботи та обґрунтувати задачі дослідження.

У другому розділі здійснено математичну постановку задачі визначення характеристик НДС гумових та гумо-кордних елементів машинобудівних конструкцій. В основу покладено основні співвідношення нелінійної теорії пружності, які дозволяють враховувати характерні особливості відповідних конструктивних елементів, що полягають у їх можливості відтворювати скінчені деформації. Наведено 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 їх використання.

Запропоновано підхід до ітеративного багатомасштабного скінчено-елементного моделювання композиційних матеріалів та гумових елементів конструкцій, які дозволяють з одного боку вирішувати практичні задачі, що враховують особливості конструкції, внутрішню будову та граничні умови.

У третьому розділі представлено удосконалену модель кінетики росту розсіяних втомних пошкоджень в гумових матеріалах в рамках теорії континуальної механіки пошкоджуваності з урахуванням геометрично та фізично нелінійної поведінки матеріалу, а також впливу процесів старіння. Визначено зв'язок між характеристиками класичної кривої втоми та параметрами кінетичного рівняння накопичення втомної пошкоджуваності

відповідно до запропонованої моделі.

На основі створеної моделі та визначених констант для двох різних матеріалів було теоретично розраховано області довірчого інтервалу можливої варіації пошкоджуваності для декількох тестових варіантів їх навантаження. Порівняння отриманих розрахункових результатів із експериментальними даними по довірчому інтервалу для пошкоджуваності вказує їх якісну узгодженість між собою.

У четвертому розділі наведено результати проведених експериментальних досліджень по визначенню характеристик пружності та міцності для трьох типових гумових матеріалів. Отримані експериментальні дані використані в дисертаційній роботі у подальших дослідженнях при вирішенні практичних задач з оцінки ресурсу та загального деформування в роботі гумо-кордних компенсаторних муфт та пневматичних шин.

Представлено результати досліджень залежності зміни зареєстрованих напружень 1-го тензору Піола-Кірхгофа в зразках із фіксованим рівнем деформацій, що пояснюється накопиченням втомної пошкоджуваності в матеріалі.

П'ятий розділ присвячено розрахунково-експериментальним дослідженням по оцінці пружності та міцності гумо-кордних композитів, зокрема і після їх штучного старіння. Представлено результати проведених експериментально-розрахункових досліджень із зразків композитного матеріалу, які дозволяють оцінити його ортотропні пружні характеристики. Порівняння розрахункових результатів та експериментальних даних мають задовільну узгодженість між собою.

Описана скінчено-елементна модель зразку композиту, який явним чином враховує наявність кордних елементів. Отримані картини розподілу параметрів НДС по внутрішній структурі композиту, що показують наявність суттєвої внутрішньої концентрації деформацій в місцях розташування кордних елементів.

У шостому розділі запропоновано систему параметризації та методологію автоматизованого проектування пневматичних шин для широкого класу їх модельного ряду, що дозволяють врахувати їх внутрішню

багатошарову структуру, криволінійну ортотропію механічних властивостей для композитних шарів. Відповідна методологія реалізована у вигляді створеної інформаційної системи автоматизованого параметричного проектування пневматичних шин.

В розділі представлено теоретичні дослідження особливостей контактної взаємодії пневматичних шин легкових автомобілів з твердою дорожньою основою. Визначені її інтегральні жорсткісні характеристики в різних напрямках та з урахуванням різного внутрішнього тиску в шині. Досліджено особливості формування циклів зміни НДС в найбільш навантажених зонах шини, що формуються під час кочення колеса.

Проведено розрахункові дослідження щодо визначення ресурсу пневматичних шин при відмовах, що викликані втомою з урахуванням різних умов експлуатації та процесів старіння гумових матеріалів.

У сьомому розділі отримав подальший розвиток розрахунковий метод, який було запропоновано в 3-му розділі дисертації для прогнозування надійності та оцінки ресурсу гумо-кордних елементів машинобудівних конструкцій на випадок врахування наявності випадкової варіації амплітуди циклічної зміни параметрів НДС, як вузькополосного випадкового процесу.

На основі запропонованого в дисертації підходу до створення розрахункових скінчено-елементних моделей різного масштабу розгляду, розроблено ієрархічну систему зв'язаних скінчено-елементних моделей компенсаторної гумо-кордної муфти, що враховують особливості її криволінійної тривимірної геометрії та внутрішньої багатошарової структури, та дозволяють оцінити рівні концентрації характеристик НДС.

Проведено аналіз надійності даних елементів машинобудівних конструкцій з урахуванням того, що характеристики НДС представляють собою вузькополосний стаціонарний випадковий процес. Визначено параметри надійності конструкцій: гарантований та середній ресурс.

Розроблено відповідну спеціалізовану програму САПР.

Висновки по роботі сформульовані достатньо чітко та відповідають змісту дисертації.

Зміст автореферату відображає основний зміст дисертації та достатньо повно розкриває внесок здобувача в наукові результати та практичну цінність роботи.

Зауваження по дисертаційній роботі:

1. В дисертаційній роботі запропоновано модель кінетики розсіяних втомних пошкоджень та досліджуються процеси її накопичення в гумових матеріалах та гумо-кордних композитах із врахуванням характерних для даних матеріалів факторів та особливостей поведінки проте розроблені моделі обмежені виключно скалярним параметром пошкоджуваності. Робота суттєво виграла б, коли процес накопичення пошкоджень розглядався як анізотропний процес з відповідним введенням тензорного параметра пошкоджуваності.

2. Одним із здобутків даної роботи є врахування процесу старіння на швидкість накопичення втомних пошкоджень, що є важливою складовою при оцінці ресурсу елементів конструкцій з гумовими матеріалами. Зазначене моделювання проводиться в рамках припущення щодо незалежності процесів старіння від зовнішнього навантаження, але не зрозуміло як враховується очевидна залежність даного процесу від умов експлуатації, від зовнішнього середовища (присутність агресивного середовища, кліматичних умов, вологості, сезонної зміни температури тощо).

3. В рамках розробки методу прогнозування надійності в роботі вводиться припущення щодо того що введена спеціальним чином випадкова функція $U(t)$ є адитивною і тому її щільність ймовірності задовольняє нормальному закону Гауса. Така гіпотеза потребує більш жорсткої аргументації та обґрунтування меж застосування, оскільки з фізичної точки зору дана функція алгебраїчно пов'язана із параметром пошкоджуваності і є додатною, в той час як нормальний розподіл Гауса надає їй можливості варіації у бік від'ємних значень задач (роботи Л.А. Сосновського [323] та В.П. Когаєва [347]).

4. В роботі представлено результати імплементації розробленого розрахункового методу оцінки ймовірнісних характеристик ресурсу в сучасні

програмні комплекси скінчено-елементного моделювання, але недостатньо уваги приділяється висвітленню питань того, як було виконано зазначену реалізацію. З тексту дисертації також не зрозуміло чи обмежився автор вирішенням лише тестових задач чи отримана програмна реалізація застосовувалась також для вирішення практичних.

5. При проведенні експериментальних досліджень на втому зразків гумових матеріалів та гумо-кордних композитів було використано жорстке циклічне навантаження із частотою 5 Гц. В роботі відзначено, що таке значення обиралось із метою запобігання виникнення полігармонічних вібрацій, але таке пояснення не є цілком зрозумілим. Звідки виникають зазначені вібрації та з чим пов'язано вибір даної частоти навантаження? Чи проводились дослідження впливу частоти циклічного навантаження на отримані результати?

6. В роботі експериментально показано, що термічне старіння суттєво зменшує кількість циклів до відмови при тестах на втому для гумо-кордних композитів, але не описано як впливає термічне старіння на характеристики міцності та пружності гумо-кордного композиту, в той час як відзначено, що для зразків з чистої гуми спостерігається суттєве зменшення граничних деформацій на розрив та підвищення жорсткості матеріалу.

7. В шостому розділі дисертації представлено результати чисельних досліджень роботи пневматичної шини легкових автомобілів в контакті з дорожньою основою. В роботі недостатньо уваги приділяється опису особливостей вирішення контактної задачі: який метод було обрано, дорожня основа вважалась абсолютно твердою чи деформованою, чи враховувалось тертя тощо?

8. В рамках вирішення задачі щодо аналізу деформування амортизаційної прокладки в роботі наголошено на використанні спеціальної скінчено-елементної технології для моделювання композитних шарів, що мають кордне армування. В тексті дисертації це питання описано досить стисло. Залишається не зрозумілим, чому було обрано такий підхід замість традиційного завдання усереднених ортотропних властивостей матеріалу

відповідним шарам.

Разом із тим слід наголосити, що вказані недоліки не впливають на загальну позитивну оцінку виконаної роботи.

ВИСНОВОК

Дисертаційна робота Ларіна Олексія Олександровича «Теоретичні основи прогнозування надійності елементів машин з гумо-кордними композитами при відмовах, що викликані втомою» є завершеною науково-дослідною роботою, яка розв'язує важливу науково-прикладну проблему, що полягає у розробці розрахунково-експлуатаційних методів прогнозування ресурсу елементів машинобудівних конструкцій на основі нових ймовірнісних моделей накопичення втомних розсіяних пошкоджень в гумо-кордних матеріалах. Дисертаційна робота за своїм змістом та напрямом досліджень відповідає паспорту спеціальності 05.02.09 – динаміка та міцність машин.

Дисертаційна робота відповідає вимогам п.п. 9, 10, 12 «Порядку присудження наукових ступенів», щодо докторських дисертацій, а здобувач Ларін Олексій Олександрович, заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин.

Офіційний опонент:

директор механіко-машинобудівного інституту

Національного технічного університету України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

член-кореспондент НАН України,

доктор технічних наук, професор

