

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

МАРТИНЕНКО ВОЛОДИМИР ГЕННАДІЙОВИЧ



УДК 539.376

**РОЗРОБКА МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ ІЗ
В'ЯЗКОПРУЖНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ**

Спеціальність 05.02.09 – динаміка та міцність машин

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2018

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, професор
Львов Геннадій Іванович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
завідувач кафедри динаміки та міцності машин.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Шукаєв Сергій Миколайович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені
Ігоря Сікорського», м. Київ,
професор кафедри динаміки і міцності машин
та опору матеріалів;

кандидат технічних наук
Жигилій Дмитро Олексійович,
Сумський державний університет, м. Суми
доцент кафедри опору матеріалів
і машинознавства.

Захист відбудеться 17 жовтня 2018 р. о 14⁰⁰ 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 10 вересня 2018 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Ларін О.О.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Проблема моделювання механічної поведінки композиційних елементів конструкцій і машин є ключовою при їхньому проектуванні. Для коректної симуляції механіки армованих композитів враховують ряд явищ, зокрема явища пружності та в'язкопружності, які через спрямованість армування можуть мати загальний ступінь анізотропії. Традиційно для моделювання в'язкопружної поведінки полімерних армованих композиційних матеріалів застосовуються фізичні співвідношення, в яких ступінь анізотропії в'язкопружних властивостей визначається ступенем анізотропії пружних властивостей. При цьому криві релаксації жорсткості матеріалу та параметрів в'язкопружності є подібними одна одній. Однак для багатьох композитів виникає потреба в коректному врахуванні пружних та в'язкопружних властивостей із незалежними ступенями анізотропії.

На даний момент було запропоновано багато підходів до моделювання анізотропної в'язкопружності. Частіше за все такі підходи представляють із себе аналітичні моделі або чисельні алгоритми зниженої розмірності, що надають можливість розв'язання окремих класів задач та у застосуванні до обмежених геометричних форм. Іншим шляхом вирішення такої задачі є використання програмних комплексів скінченно-елементного аналізу, які дозволяють розв'язувати практичні задачі в'язкопружності у найбільш загальній постановці, але обмежені моделлю в'язкопружних властивостей, в якій ступінь її анізотропії є пропорційним ступеню анізотропії пружних властивостей.

Отже, проведення розрахункових та експериментальних досліджень щодо визначення ступеня анізотропії в'язкопружних властивостей полімерних армованих композиційних матеріалів та обґрунтування незалежності ступеня анізотропії в'язкопружності від ступеня анізотропії пружності, а також розробка комплексного методу моделювання їхньої механічної поведінки для практичної спрямованості є актуальною науково-практичною роботою, яка визначила напрямок досліджень дисертації.

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 з 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 був виконавцем окремих етапів.

Мета і задачі дослідження. *Мета дослідження* – теоретична та експериментальна оцінка анізотропії в'язкопружних властивостей полімерних армованих композиційних матеріалів, ступінь якої є незалежним від ступеня анізотро-

пії пружних властивостей, а також розробка розрахункового методу врахування загального ступеня анізотропії в'язкопружності для аналізу конструкційної міцності елементів конструкцій і машин при статичних та термосилових навантаженнях.

Для досягнення зазначеної мети поставлені наступні *завдання*:

- дослідити особливості в'язкопружної деформації композиційних матеріалів в високонавантажених елементах сучасних конструкцій і машин, встановити основні підходи до знаходження параметрів таких властивостей та їхні фізичні моделі, а також провести аналіз існуючих методів моделювання контактної механічної поведінки ізотропних та анізотропних, пружних та в'язкопружних композиційних елементів конструкцій і машин;

- розробити метод моделювання анізотропних в'язкопружних властивостей матеріалів в програмних комплексах скінченно-елементного аналізу, оцінити його похибку та вплив на загальну продуктивність скінченно-елементної процедури, а також довести збіжність та застосовність методу при моделюванні контактної механічної поведінки анізотропних в'язкопружних композиційних елементів конструкцій і машин;

- розробити розрахункову модель та чисельну методику отримання табличних залежностей ортотропних в'язкопружних властивостей полімерного армованого композиційного матеріалу від часу та температури за наявними ізотропними пружними властивостями волокон та ізотропними в'язкопружними властивостями епоксидної матриці, що дозволяє розраховувати його коефіцієнти тензору релаксації та технічні в'язкопружні параметри, проаналізувати відмінності коефіцієнтів тензору релаксації та технічних в'язкопружних параметрів та встановити рівень анізотропії в'язкопружних властивостей, що спричинений двоспрямованим армуванням композиційного матеріалу;

- розробити методику й провести експериментальне дослідження анізотропних в'язкопружних властивостей полімерного армованого композиційного матеріалу та порівняти отримані дані із результатами, знайденими за допомогою структурного методу, для доведення адекватності проведених чисельних досліджень;

- розв'язати практичну задачу оцінки конструкційної міцності пошкодженої ділянки магістрального трубопроводу, посиленого ремонтним бандажем, із застосуванням запропонованих методів моделювання анізотропії в'язкопружних властивостей в аналітичних співвідношеннях та програмних комплексах інженерного аналізу, а також розробити методику розв'язання контактних задач анізотропної в'язкопружності композиційних елементів конструкцій і машин.

Об'єктом дослідження є явища анізотропної пружності та в'язкопружності полімерних армованих композиційних матеріалів, а також контактна механічна поведінка елементів конструкцій і машин, виконаних з них.

Предмет дослідження – механічні властивості полімерних армованих композиційних матеріалів, що потребують адекватного встановлення парамет-

рів анізотропної в'язкопружності, а також математичні моделі, які з достатньою точністю здатні описати їхню механічну поведінку.

Методи дослідження. Теоретичні положення дисертаційної роботи ґрунтуються на методах інженерної механіки та механіки твердого деформівного тіла. Методи теорії в'язкопружності, такі як моделювання фізичних співвідношень за допомогою спадкового інтегралу Больцмана, представлення ядер цих співвідношень за допомогою рядів Проні, а також врахування температурних залежностей терморологічно простих матеріалів за допомогою температурних зсувних функцій, використовувались при отриманні, обробці та використанні даних про в'язкопружну поведінку композиційних матеріалів, а також при моделюванні їхньої механічної поведінки. Метод скінченних елементів використовувався для створення нової методики моделювання анізотропних в'язкопружних властивостей в програмних комплексах інженерного аналізу; для реалізації чисельних експериментів з метою гомогенізації в'язкопружних властивостей композиційного матеріалу; для моделювання тривимірної контактної поведінки ділянки пружного трубопроводу із в'язкопружним бандажем. Метод найменших квадратів використовувався для апроксимації отриманих при проведенні чисельних та натурних експериментів табличних залежностей в'язкопружних властивостей композиційних матеріалів від часу та температури. Методи розв'язання систем диференційних та інтегральних рівнянь використовувались для реалізації аналітичної та чисельно-аналітичної моделей контакту трубопроводу із ремонтним бандажем.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у тому, що вперше зроблено наступне:

- вперше розроблено метод, що не потребує написання додаткових модулів або процедур для програмних комплексів скінченно-елементного аналізу, який дозволив змоделювати загальний ступінь анізотропії в'язкопружних властивостей матеріалу в цих програмних комплексах. Була доведена задовільна збіжність цього методу та його застосовність до розв'язання прикладних наукових та інженерних задач;

- вперше за допомогою створеної чисельної методики гомогенізації та експериментального дослідження ортотропних в'язкопружних властивостей полімерних армованих композиційних матеріалів при підвищених температурах доведена непропорційність в'язкопружних властивостей його пружним властивостям та неподібність кривих релаксації технічних параметрів в'язкопружності, що обґрунтовує необхідність врахування ефекту анізотропної в'язкопружності. Окрім того встановлено, що температурна зсувна функція композиту якісно та кількісно співпадає із зсувною функцією матриці;

- вперше побудовано аналітичну та чисельно-аналітичну моделі плоскої вісесиметричної контактної поведінки ділянки пружного трубопроводу із в'язкопружним бандажем, що дозволяють враховувати різні режими монтажу бандажа та ступені анізотропії в'язкопружних властивостей;

Знайшли подальший розвиток уявлення про механізм прояву полімерними армованими композиційними матеріалами явища в'язкопружності, за яким ані-

зотропія таких властивостей визначається схемою армування та властивостями їхніх волокон і матриці, у загальному випадку залежних від часу та температури, що дозволило адекватно описати в'язкопружну поведінку армованих композитів та уточнити результати розрахунків міцності конструкцій.

Практичне значення отриманих результатів для машинобудування полягає у тому, що представлений в роботі комплексний підхід до чисельного та експериментального знаходження параметрів анізотропної в'язкопружності полімерних армованих композиційних матеріалів, а також методика їхнього моделювання в програмних комплексах скінченно-елементного аналізу є замкнутою схемою врахування такого явища при розрахунках міцності композиційних елементів конструкцій і машин. Це знайшло свою реалізацію при визначенні напружено-деформованого стану ділянки трубопроводу із ортотропним в'язкопружним бандажем. Розроблені аналітична та чисельно-аналітична моделі їхнього контакту дозволяють швидко моделювати процес ремонту та із високою точністю визначати його ефективність, що може бути використано в практиці ремонтних робіт вітчизняних магістральних трубопроводів.

Ці наукові результати, отримані в дисертації, впроваджені у відповідності до результатів виконання європейського гранту «INNOPIPES» в НТУ «ХП». Окрім цього такий комплексний підхід використано в практиці проектно-дослідних робіт вітчизняного машинобудівного підприємства ТОВ «ІТЦ «Донвентилятор» (м. Харків).

Особистий внесок здобувача. Усі положення і результати, винесені на захист дисертаційної роботи, отримані здобувачем особисто. Серед них: обґрунтування планів і програм експериментів, їхня реалізація, особиста участь в обробці результатів. Постановка цілей і задач досліджень, аналіз і обговорення отриманих результатів виконувалися здобувачем разом із науковим керівником. На основі критичного аналізу науково-технічної літератури [9] здобувачем встановлено неповноту існуючих методів моделювання анізотропної в'язкопружної поведінки композиційних елементів конструкцій і машин та найбільш оптимальні шляхи їхнього вдосконалення та узагальнення. Результати проведених здобувачем чисельних [6-7, 18] та натурних експериментів [5, 16, 21] з визначення параметрів анізотропної в'язкопружності полімерних армованих композиційних матеріалів при підвищених температурах корелюють між собою, підтверджують необхідність створення загального методу моделювання анізотропної в'язкопружної поведінки композиційних елементів конструкцій і машин та використані в узагальнених моделях анізотропної в'язкопружності. Запропонований здобувачем метод врахування ефекту анізотропної в'язкопружності матеріалу в програмних комплексах скінченно-елементного аналізу [8, 19, 20] дозволив йому розв'язати ряд практичних задач [17, 22, 23] та значно уточнити результати розрахунку напружено-деформованого стану та міцності конструкцій, виконаних з в'язкопружних композиційних матеріалів [1, 10, 13]. Внесок автора в роботи, опубліковані у співавторстві, полягав у розробці аналітичних [2, 4, 14, 15] та чисельно-аналітичних моделей [3, 11, 12], їхніх реалізацій [1, 10, 13, 20], проведенні чи-

сельних досліджень [6-7, 18], безпосередній участі в аналізі та інтерпретації даних, підготовці публікацій і проведенні експериментальних випробувань [5, 16, 21].

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати роботи доповідались на Міжнародних науково-практичних конференціях: Конференції магістрантів та аспірантів НТУ «ХПІ» (Харків, 2014-2015, 2017-2018), «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (Харків, 2014-2018), «Безразрушительный контроль в современной индустрия» (Софія, 2015), «Сучасні проблеми машинобудування» (Харків, 2016), «Сучасні проблеми механіки та математики» (Львів, 2018), «Актуальні проблеми інженерної механіки» (Одеса, 2018).

Публікації. Основний зміст дисертації відображено у 23 наукових публікаціях, з них: 7 статей у наукових фахових виданнях України, 2 - у закордонних періодичних фахових виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз, 1 - у закордонному неперіодичному виданні, 13 - у матеріалах конференцій.

Структура й обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з анотації двома мовами, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації становить 196 сторінок, з них основного тексту 145 сторінок; 51 рисунок по тексту; 1 рисунок на 1 окремій сторінці; 26 таблиць по тексту; 6 таблиць на 2 окремих сторінках; 1 таблиця та 1 рисунок на 1 окремій сторінці; списку використаних джерел з 223 найменувань на 24 сторінках; 5 додатків на 22 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

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

Перший розділ присвячено аналізу науково-технічної інформації щодо способів моделювання механічних властивостей та напружено-деформованого стану полімерних армованих композиційних матеріалів, зокрема в'язкопружності.

Наведені приклади використання армованих композиційних матеріалів у якості високонавантажених елементів конструкцій і машин.

Встановлені існуючі методи моделювання в'язкопружної поведінки матеріалів, фундаментальний внесок в створення та вдосконалення яких зробили такі науковці як R.A. Schapery, J.D. Ferry, R.M. Christensen, A.Q. Tool, M. Shinozuka, O.S. Narayanaswamy, M. Shen, M.L. Williams, R.F. Landel, I.M. Ward, Ю.М. Работнов, М.М. Малінін, А.С. Кравчук, В.В. Москвітін, А.А. Адамов, Г.Б. Кузнецов, Л.А. Галін, І.І. Нарісаєва та багато інших.

Також в розділі проаналізовано традиційні підходи до знаходження в'язкопружних властивостей матеріалів та встановлено, що їх можна поділити на дві групи: структурні та феноменологічні. Значний внесок в визначення в'язкопружних властивостей за допомогою першої групи методів зробили такі

вчені як J.G. Kohl, J. Feng, I.V. Andrianov, S. Sawant, A. Muliana, L. Yang, M.V. Pathan, V.G. Tagarielly, С.М. Шукаєв, Н. Altenbach, В.О. Федоров та інші, а за допомогою другої групи методів – Z. Sun, P. Gang, J. Abot, H. Guojun, P. Silva, O.E. Seifert та інші.

Встановлено, що в одновимірному випадку в'язкопружна поведінка матеріалу характеризується спадковим інтегралом Больцмана

$$\sigma(t) = \int_0^t E(t - \xi, T) \frac{d\varepsilon(\xi)}{d\xi} d\xi, \quad (1)$$

де t – змінна часу; ξ – час, що сплинув; T – змінна температури; $\varepsilon(t)$ – деформація; $\sigma(t)$ – напруження; $E(t, T)$ – модуль релаксації.

Відповідно до узагальненої моделі Максвелла модуль релаксації може бути виражений через її жорсткості k_e, k_i та в'язкості μ_i ($i = 1..N$, де N – число демпфуючих елементів) у вигляді експоненціальних рядів Проні

$$E(t, T) = E_0 + \sum_i E_i \exp(-t / \tau_i), \quad (2)$$

де $\tau_i = \mu_i / k_i$ – так звані часи релаксації матеріалу; $E_0 = k_e$ – миттєвий модуль пружності матеріалу; $E_i = k_i$ – множники рядів Проні.

Температурна залежність в'язкопружних властивостей композиційних матеріалів із однофазною матрицею, що є термореологічно простими матеріалами, моделюється таким чином, що у відповідність в'язкопружній поведінці матеріалу при температурі T ставиться його в'язкопружна поведінка при відносній температурі T_{ref} із врахуванням часового зсуву за допомогою зсувної функції α_T . Для модуля релаксації E , що розглядається у даному випадку, це виражається у співвідношенні $E(t, T_{ref}) = E(\alpha_T t, T)$. Зсувна функція Вільямса-Ландела-Феррі має вигляд

$$\lg \alpha_T = -\frac{K_1(T - T_{ref})}{K_2 + (T - T_{ref})}, \quad (3)$$

де K_1 та K_2 – параметри зсувної функції.

Узагальнення спадкового інтегралу (1) до тривимірного випадку можна виразити тензорним співвідношенням у покомпонентному вигляді

$$\sigma_{ij}(t) = \int_0^t \sum_{kl} C_{ijkl}(t - \xi, T) \frac{d\varepsilon_{kl}(\xi)}{d\xi} d\xi, \quad (4)$$

де $C_{ijkl}(t, T)$ – залежні від часу та температури компоненти тензора релаксації в'язкопружного матеріалу; $\sigma_{ij}(t)$ – компоненти тензора напружень; $\varepsilon_{kl}(t)$ – компоненти тензора деформацій; $i, j, k, l = 1..3$.

Встановлено, що традиційні підходи до моделювання в'язкопружної поведінки матеріалів у тривимірному випадку використовують спрощені фізичні співвідношення, в яких криві релаксації в'язкопружних параметрів є пропорційними одна одній, що відповідає їхньому вигляду

$$\hat{\sigma}(t) = \int_0^t 2\hat{G}(t - \xi) \frac{d\hat{\varepsilon}(\xi)}{d\xi} d\xi + \hat{I} \int_0^t K(t - \xi) \frac{d\Delta(\xi)}{d\xi} d\xi, \quad (5)$$

де $\hat{\sigma}(t)$ – тензор напружень другого рангу; $\hat{G}(t)$, $K(t)$ – зсувна та об’ємна частини тензора релаксації, залежні зазвичай і від температури; $\hat{e}(t)$, $\Delta = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}$ та \hat{I} – дівіаторна та сферова деформації та одиничний тензор.

Окрім аналізу існуючих моделей в’язкопружної поведінки матеріалів в розділі наведена інформація щодо моделювання механічної, у тому числі контактної, поведінки елементів конструкцій і машин, виконаних із полімерних армованих композиційних матеріалів, що частіше за все є тонкими оболонками. Встановлено, що великий внесок в розвиток механіки ізотропних та анізотропних тонкостінних елементів конструкцій і машин із властивостями пружності, в’язкопружності та повзучості зробили такі вчені як С.П. Тимошенко, В.В. Новожилов, Л.М. Гольденвейзер, Б.Я. Кантор, Я.М. Григоренко, Л.В. Мольченко, Я.В. Григолюк, Б.Є. Победря, В.В. Васильєв, А.В. Бурлаков, Г.І. Львов, О.К. Морачковський, Д.В. Бреславський, К.В. Аврамов, М.К. Кучер, І.Ю. Бабич, С.М. Верещака, О.М. Шупіков, В.Л. Бажанов, В.А. Баженов, С.О. Пискунов та багато інших науковців. Серед зарубіжних авторів даною проблемою займалися J.N. Reddy, J.R. Vinson, E. Carrera, E.L. Axelrad, W.V. Krätzig, L. Librescu, A.K. Noor та інші.

Таким чином, задача вдосконалення старих та створення нових методів моделювання анізотропної в’язкопружності полімерних армованих композиційних матеріалів потребує подальшого розвитку, зокрема у напрямках створення комплексних підходів з встановлення ступеня анізотропії в’язкопружних властивостей композитів та адекватного моделювання їхньої механіки у загальній постановці.

У **другому розділі** запропонований новий підхід до моделювання анізотропних в’язкопружних властивостей матеріалів у програмних комплексах скінченно-елементного аналізу, що названий методом накладених сіток.

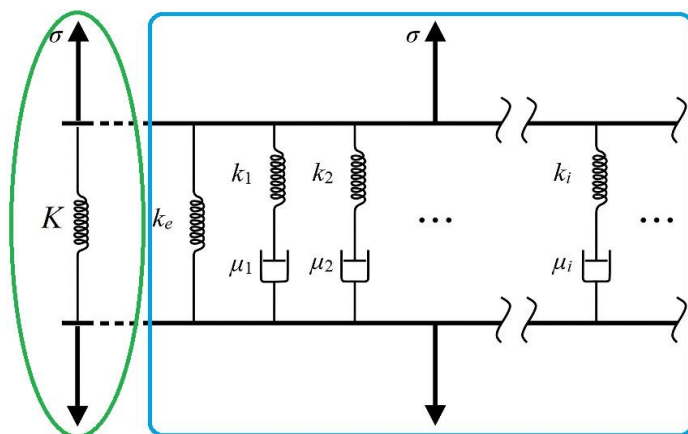


Рисунок 1 – Комбінована реологічна модель в’язкопружного матеріалу

Розглядається комбінована реологічна модель (рис. 1). Для моделювання складних властивостей матеріалу пропонується об’єднати декілька реологічних моделей, як це показано на рис. 1 для реологічної моделі пружного та в’язкопружного матеріалів. Для одновимірного випадку така технологія не надає додаткових можливостей у моделюванні, оскільки пружні та демпфуючі властивості матеріалу можуть бути змодельовані за допомогою однієї простої

реологічної моделі без запобігання до їхніх комбінацій. Але в багатовимірних випадках ця технологія дозволяє при коректному обранні параметрів матеріалів

моделювати різний ступінь анізотропії в'язкопружних властивостей у різних напрямках.

У застосуванні до скінченно-елементної процедури метод накладених сіток полягає в тому, що в одному і тому ж місці створюється два ідентичні об'єми. Далі вони послідовно розбиваються скінченно-елементними сітками – кожен об'єм зі своїми властивостями (пружними чи в'язкопружними). Оскільки алгоритм побудови скінченно-елементної сітки однаково діє для ідентичних об'ємів із однаковими налаштуваннями розбиття, вузли та елементи обох сіток просторово співпадають один з одним, а на наступному кроці можливо об'єднати всі вузли. Тоді отримані вузли відповідають елементам пружної та в'язкопружної груп одночасно, їхня кількість після злиття стає вдвічі меншою, а кількість елементів залишається незмінною.

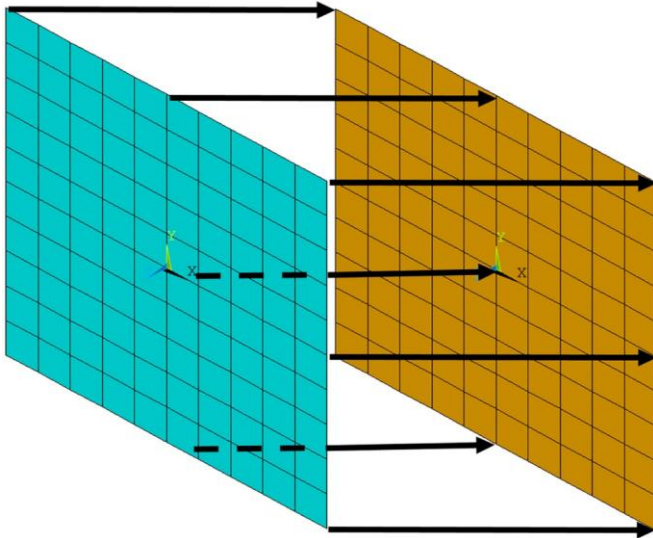


Рисунок 2 – Злиття просторово співпадаючих вузлів скінченно-елементних моделей

Об'єднана скінченно-елементна модель буде деформуватись спільно, а кожний із шарів скінченно-елементних сіток буде вносити власний вклад у енергетичний потенціал. Це означає, що елементи кожної групи матеріалу будуть знаходитись у індивідуальному напруженому стані в одному і тому ж полі переміщень. Отримане внаслідок цього тензорне поле напружень в моделі є сумою тензорів напружень для кожної групи елементів. Схематично методика показана на рис. 2.

Така комбінація матеріалів при правильному підборі параметрів різних шарів (зануленні певних компонентів тензорів релаксації із залишенням певних значущих компонент) дозволяє задавати в'язкопружні властивості в загальному вигляді із повністю незалежними параметрами в'язкопружності у різних напрямках і приводить до нового вигляду фізичних співвідношень, які для випадку вираження ядер релаксації через експоненціальні члени Проні мають вигляд

$$\begin{aligned}
 (\hat{\sigma}(t))_{ijkl} &= \int_0^{\tilde{t}_{ijkl}} \hat{G}_{ijkl}(\tilde{t}_{ijkl} - \xi) \frac{d\hat{e}(\xi)}{d\xi} d\xi + \hat{I} \int_0^{\tilde{t}_{ijkl}} K_{ijkl}(\tilde{t}_{ijkl} - \xi) \frac{d\Delta(\xi)}{d\xi} d\xi; \\
 \begin{cases} \hat{G}_{ijkl}(t) = (\hat{G}_0)_{ijkl} [(a_{\infty}^G)_{ijkl} + \sum_{n_G} (a_{n_G}^G)_{ijkl} \exp(-\frac{t}{(\tau_{n_G}^G)_{ijkl}})]; \\ K_{ijkl}(t) = (K_0)_{ijkl} [(a_{\infty}^K)_{ijkl} + \sum_{n_K} (a_{n_K}^K)_{ijkl} \exp(-\frac{t}{(\tau_{n_K}^K)_{ijkl}})]; \end{cases} & (6) \\
 \tilde{t}_{ijkl} &= (\alpha_T)_{ijkl} t.
 \end{aligned}$$

Як видно із співвідношень (6), завдяки комбінації скінченно-елементних сіток із різними властивостями матеріалів з'являється можливість моделювання в'язкопружності із максимально можливими ступенями анізотропії.

Адекватність методики була перевірена на одновимірній (рис. 3) та двовимірній (рис. 4) задачах.

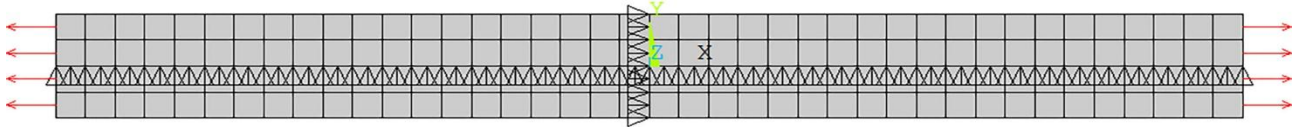


Рисунок 3 – Одновимірний скінченно-елементний елемент

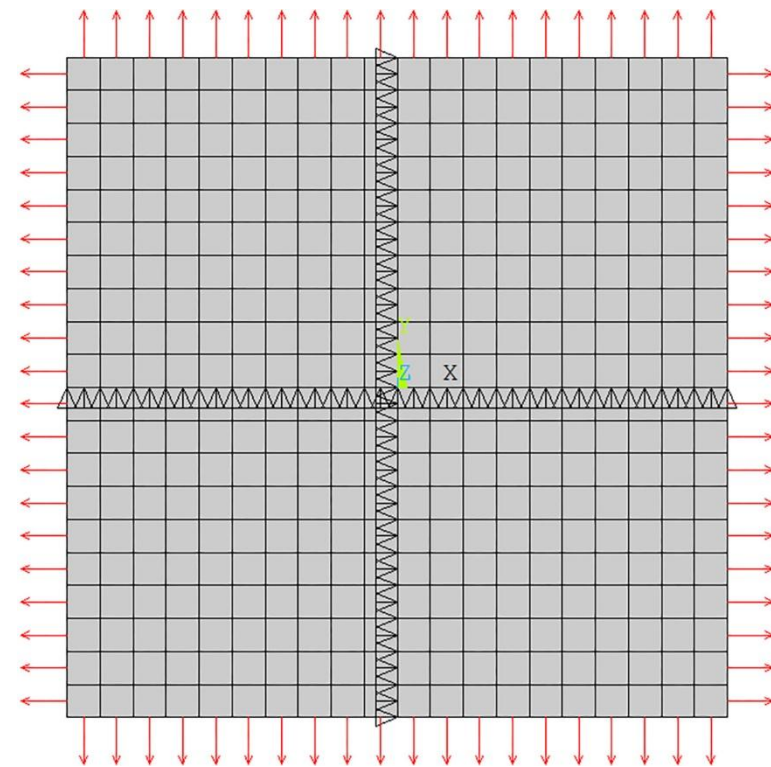


Рисунок 4 – Двовимірний скінченно-елементний елемент

Порівняння результатів розрахунків за допомогою методу накладених сіток із знайденими в роботі аналітичними розв'язками свідчить про те, що похибка розробленого методу за переміщеннями нижче за 1.3 %, а за деформаціями нижче за 0.4 %.

Окрім того, для перевірки застосовності методу накладених сіток до розв'язання реальних задач інженерної механіки була вирішена задача контакту ортотропної в'язкопружної тонкої оболонки із пружною основою (рис. 5) та визначена відносна похибка запропонованого методу за напруженнями для тривимірного випадку.

Спільний тензор напружень за методом накладених сіток може бути знайдений як сума тензорів напружень в різних шарах комбінованої скінченно-елементної моделі

$$\hat{\sigma}(t) = \sum_{ijkl} (\hat{\sigma}(t))_{ijkl} = M \hat{\sigma}_{av}(t), \quad (7)$$

де $(\hat{\sigma}(t))_{ijkl}$ – тензор напружень в одній із скінченно-елементних сіток комбінованої моделі; $\hat{\sigma}_{av}(t)$ – тензор усереднених за матеріалами напружень; M – число матеріалів у комбінованій моделі.

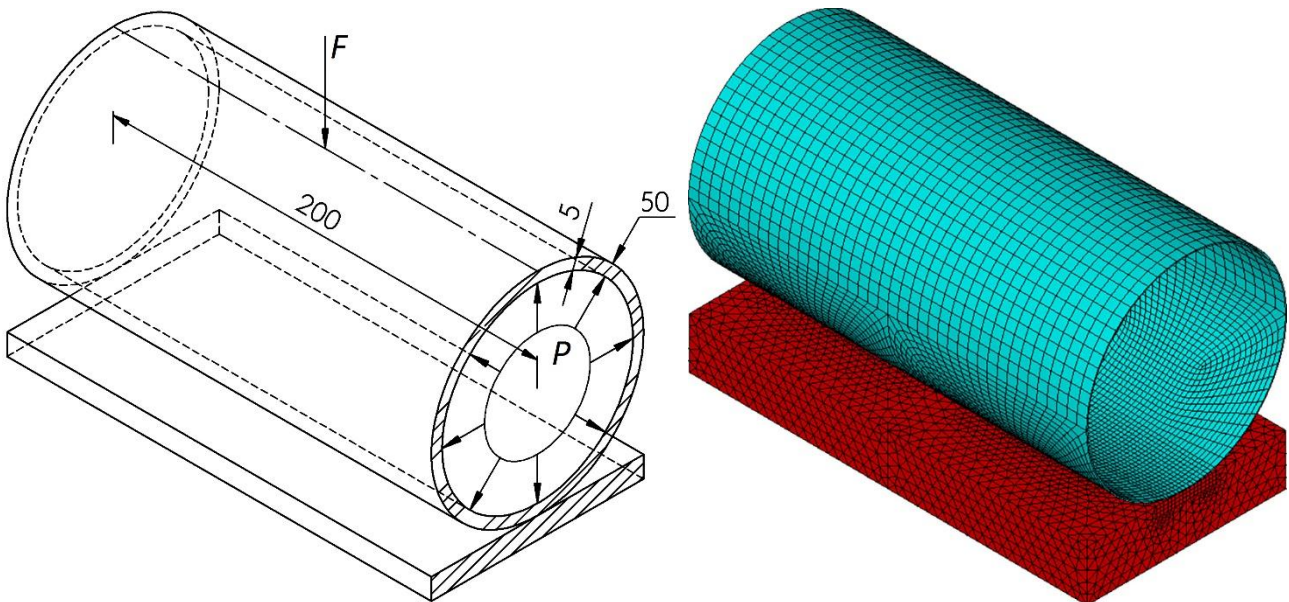


Рисунок 5 – Розрахункова та скінченно-елементна моделі задачі контакту ортотропної в'язкопружної оболонки із пружною основою

Оцінка похибки за напруженнями показала, що вона є меншою за 0.3 %. Це свідчить про те, що точність розробленого методу відповідає вимогам правил інженерних розрахунків. Аналіз ресурсомісткості методу накладених сіток показав, що для п'яти скінченно-елементних сіток в комбінованій моделі тривалість розв'язання задачі в'язкопружності зростає вдвічі порівняно із стандартною скінченно-елементною моделлю. Таким чином, представлений метод є адекватним та застосовним до вирішення реальних задач механіки твердого деформівного тіла та надає якісно нові можливості моделювання.

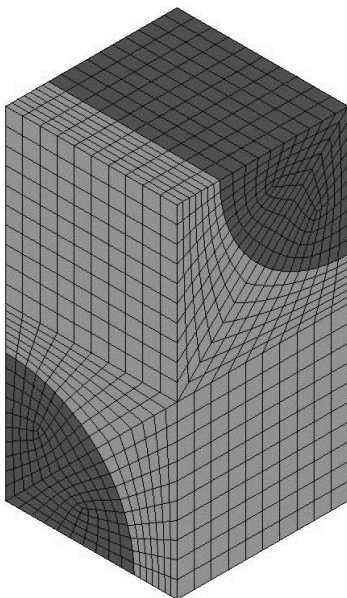


Рисунок 6 – Представницький об'єм композиційного матеріалу

У **третьому розділі** виконується серія чисельних експериментів при постійних деформаціях над представницьким об'ємом ортогонально армованого композиційного матеріалу (рис. 6), що складається з пружних скляних або трансверсально пружних вуглецевих волокон та ізотропної в'язкопружної полімерної матриці із відомими механічними властивостями. Ця серія чотирьох експериментів на розтягування та зсув представницького об'єму дозволяє отримати залежні від об'ємної концентрації волокон, часу та температури коефіцієнти тензору релаксації композиційного матеріалу в табличному вигляді, що потім апроксимуються рядами Проні за часом та зсувною функцією Вільямса-Ландела-Феррі за температурою. За допомогою розробленого методу чисельного покрокового звертання тензору релаксації отриманий тензор податливості, з якого, в свою чергу, визначені технічні параметри в'язкопружності, такі як модулі Юнга (рис. 7), модулі зсуву та коефіцієнти Пуассона, що також апроксимуються відповідними функціями (табл. 1).

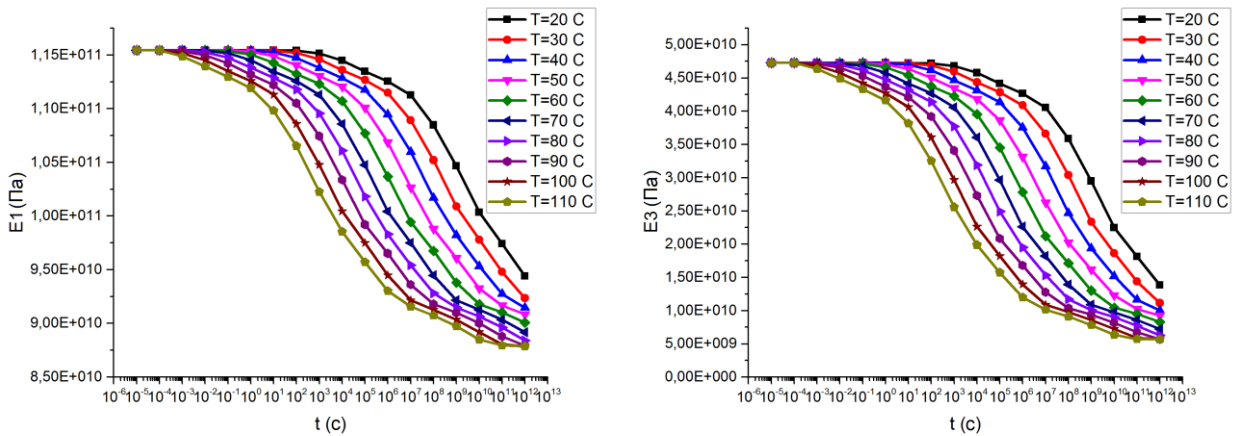


Рисунок 7 – Залежності від часу, [с] (у логарифмічній шкалі) модулів Юнга, [Па]

Таблиця 1 – Коефіцієнти апроксимації технічних в'язкопружних параметрів рядами Проні для концентрації волокон $\eta = 0.709$

i	$\tau_i, \text{с}$	$(E_i)_1, \text{Па}$	$(E_i)_3, \text{Па}$	$(G_i)_{12}, \text{Па}$	$(G_i)_{13}, \text{Па}$
1	10^{-4}	1.15E+08	1.96E+08	6.23E+07	2.67E+07
2	10^{-3}	6.55E+08	9.67E+08	3.08E+08	1.32E+08
3	10^{-2}	1.04E+09	1.78E+09	5.64E+08	2.41E+08
4	10^{-1}	1.01E+09	1.43E+09	4.65E+08	1.99E+08
5	10^0	7.78E+08	1.46E+09	4.64E+08	1.99E+08
6	10^1	2.75E+09	4.30E+09	1.36E+09	5.81E+08
7	10^2	3.61E+09	6.28E+09	2.02E+09	8.66E+08
8	10^3	5.09E+09	8.00E+09	2.57E+09	1.18E+09
9	10^4	3.00E+09	4.36E+09	1.58E+09	7.81E+08
10	10^5	2.85E+09	4.00E+09	1.27E+09	6.45E+08
11	10^6	3.25E+09	4.08E+09	1.44E+09	7.88E+08
12	10^7	9.55E-07	3.73E+08	1.17E+08	7.83E+07
13	10^8	1.18E+09	1.40E+09	4.67E+08	2.63E+08
14	10^9	1.00E+09	1.17E+09	4.07E+08	2.34E+08
15	10^{10}	1.59E+09	1.85E+09	6.15E+08	3.78E+08
E_∞, G_∞		8.75E+10	5.66E+09	1.92E+09	1.25E+09
E_0, G_0		1.15E+11	4.73E+10	1.66E+10	1.56E+10
T_{ref}		110	110	110	110
K_1		30	31.35	29.59	29.63
K_2		500	518.18	494.85	495.34

Для оцінки ступеня анізотропії в'язкопружних властивостей пропонується аналізувати безрозмірні коефіцієнти тензору релаксації $\{C_{ij}(t)\} = C_{ij}(t) / C_{ij}(0)$. Аналогічно визначаються безрозмірні технічні параметри в'язкопружності. Їхній аналіз показує, що криві релаксації в'язкопружних властивостей не є пропорційними одна одній, тобто вони не можуть бути описані за допомогою співвідношень (5), а коефіцієнти Пуассона несуттєво змінюються за часом та температурою, що дозволяє у ряді випадків вважати їх постійними. Також було встановлено, що температурна залежність в'язкопружних властивостей композиту якісно та кількісно відповідає аналогічним параметрам матриці.

В четвертому розділі описується проведене експериментальне визначення в'язкопружних властивостей склопластику, що було виконане на експериментальній машині для дослідження циліндричних металевих зразків на високотемпературну повзучість АІМА-5-2. Для реалізації експерименту над плоскими композиційними зразками була запропонована схема модернізації затискачів цієї машини (рис. 8, а), а також розроблений та побудований автоматичний регулятор температурного режиму в електричній печі, що дозволив задовольнити жорстким вимогами стандартів щодо підтримування температури при дослідженні механічних властивостей полімерів та їхніх композитів.

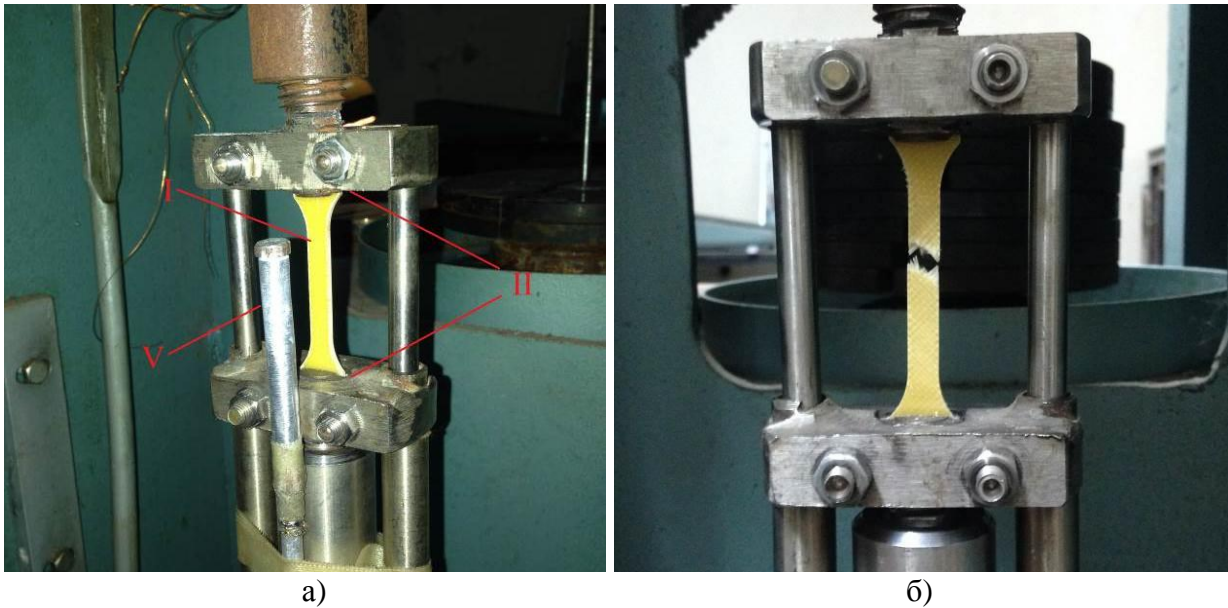


Рисунок 8 – Зразок, закріплений в затискачах, до розриву (а) та після розриву (б)

Для дослідження ефекту ортотропної в'язкопружності зразки були вирізані із одного листа склотекстоліту під різними кутами до напрямків армування – 0° , 45° та 90° .

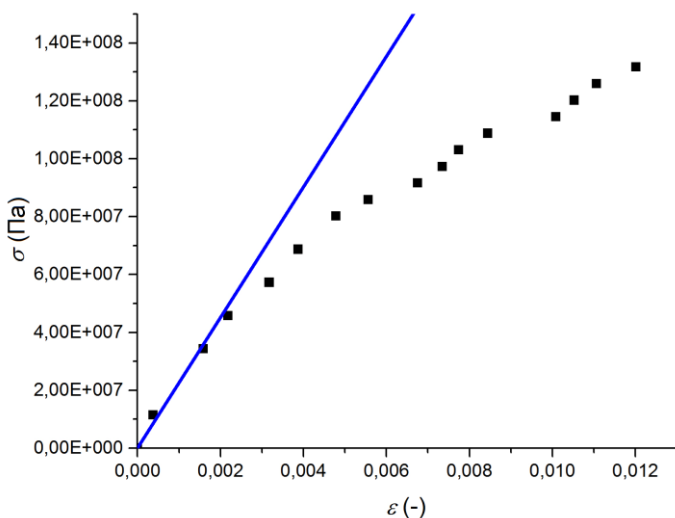


Рисунок 9 – Діаграма розтягування композиційного зразку в напрямку утоку волокон

З метою перевірки ефективності затискачів та оцінки допустимих навантажень на зразки були проведені експерименти на їхній розрив (рис. 8, б), завдяки чому побудовані діаграми розтягування композиційного матеріалу у різних напрямках (точки на рис. 9).

Аналіз лінійних областей на діаграмах (суцільна лінія на рис. 9) дозволив визначити миттєві технічні пружні постійні, такі як модулі Юнга, модулі зсуву та коефіцієнти Пуассона, при кімнатній та підвищеній температурах.

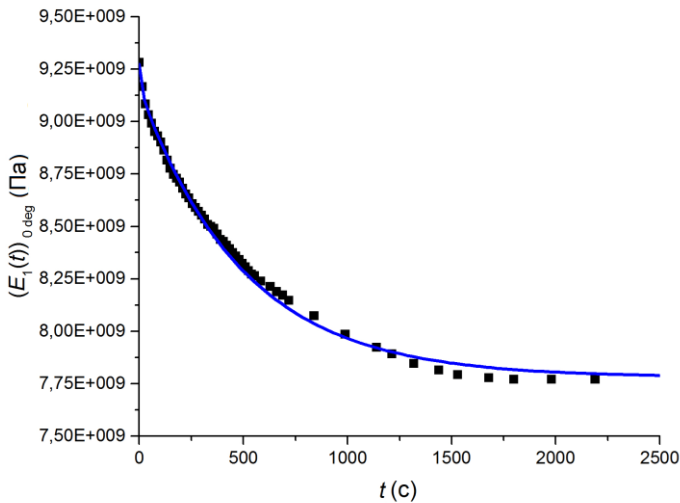


Рисунок 10 – Крива релаксації модуля Юнга

Проведені експерименти на в'язкопружну повзучість скло-текстоліту при температурі 100°C з різними рівнями навантажень продемонстрували повторюваність результатів та дозволили побудувати табличні залежності кривих повзучості, які потім були перебудовані в табличні залежності кривих релаксації технічних параметрів в'язкопружності (точки на рис. 10), а далі – апроксимовані рядами Проні із коефіцієнтами, що представлені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Коефіцієнти апроксимації кривих релаксації технічних параметрів в'язкопружності, отриманих за допомогою експериментального дослідження

i	τ_s , [с]	$(E_1(t))_{0 \text{ deg}}$, [МПа]	$(E_2(t))_{0 \text{ deg}}$, [МПа]	$(E_1(t))_{45 \text{ deg}}$, [МПа]	$(G_{12}(t))_{0 \text{ deg}}$, [МПа]
1	10	113	401	179	58
2	150	0	0	1081	315
3	500	1385	3515	49	5
	P_∞	7784	7072	967	258
	P_0	9282	10988	2276	636

Проведений аналіз кривих релаксації безрозмірних технічних параметрів в'язкопружності дозволив експериментально підтвердити прояв полімерним армованим композиційним матеріалом ефекту ортотропної в'язкопружності, непропорційність кривих релаксації його властивостей та невідповідність їхніх фізичних співвідношень формулами (5), що значно спрощують та неадекватно описують реальну механічну поведінку таких типів композитів.

Окрім того, результати експериментальних робіт кількісно та якісно корелюють із результатами чисельних експериментів, що підтверджує адекватність проведених досліджень.

В п'ятому розділі виконується розв'язання задач контактної механіки ділянки пружного сталевого трубопроводу із в'язкопружним ремонтним бандажем зі склопластику.

На основі прийнятих спрощень та припущень побудована аналітична модель плоского вісесиметричного стану конструкції, що дозволяє враховувати особливості монтажу бандажа на ненавантажений або навантажений трубопровід без натягу або з ним. Розрахункова схема такої моделі з відносними розмірами показана на рис. 11.

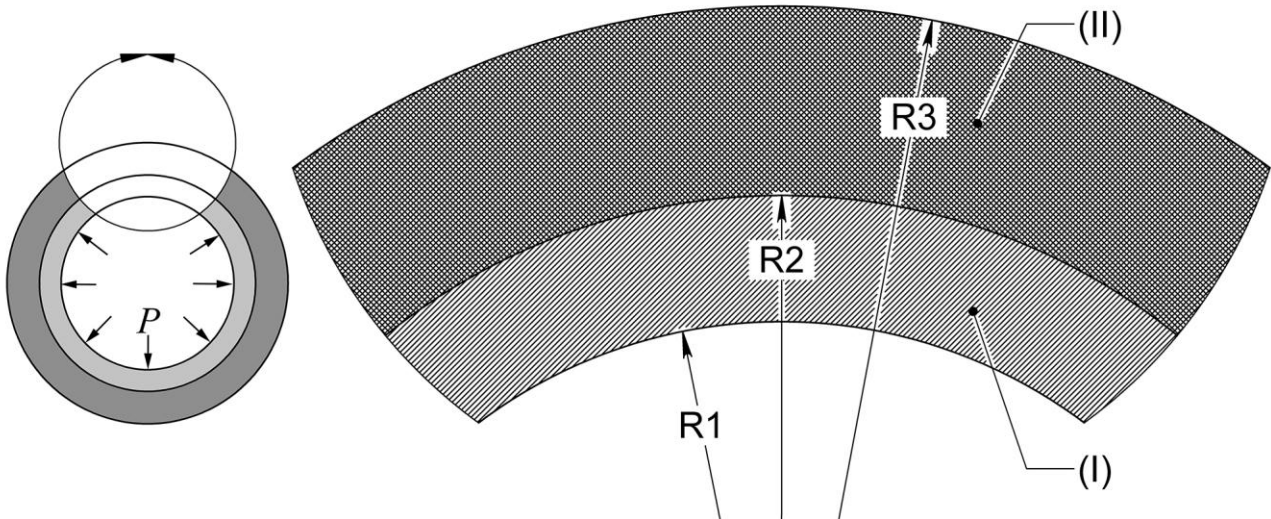


Рисунок 11 – Розрахункова схема аналітичної моделі трубопроводу з ремонтним бандажем

Для розв'язання задачі ізотропної в'язкопружності пропонується аналітичний метод вирішення крайової інтегро-диференційної задачі, яка при зведенні фізичних співвідношень до рівнянь в переміщеннях u_r має наступний вигляд

$$\begin{cases} \frac{d^2 u_r^{(I)}(r,t)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du_r^{(I)}(r,t)}{dr} - \frac{u_r^{(I)}(r,t)}{r^2} = 0; \\ \left[\frac{d^2 u_r^{(II)}(r,t)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du_r^{(II)}(r,t)}{dr} - \gamma^2 \frac{u_r^{(II)}(r,t)}{r^2} \right] - \\ - \int_0^t R(t-\xi) \left[\frac{d^2 u_r^{(II)}(r,\xi)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du_r^{(II)}(r,\xi)}{dr} - \gamma^2 \frac{u_r^{(II)}(r,\xi)}{r^2} \right] d\xi = 0; \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \sigma_r^{(I)}(R_1, t) = -P_{in2}; \\ u^{(I)}(R_2, t) - \Delta u_r = u_r^{(II)}(R_2, t); \\ \sigma_r^{(I)}(R_2, t) = \sigma_r^{(II)}(R_2, t); \\ \sigma_r^{(II)}(R_3, t) = 0, \end{cases} \quad (9)$$

де r – радіальна координата; ε_r , ε_θ – радіальні та окружні деформації відповідно; σ_r , σ_θ – радіальні та окружні напруження відповідно; C_{11} , C_{22} , $C_{12} = C_{21}$ – коефіцієнти тензору жорсткості ортотропного матеріалу (склопластику), що можуть бути виражені через модулі пружності та коефіцієнти Пуассона; (I) , (II) – позначки для матеріалу трубопроводу та матеріалу бандажу відповідно; $R(t)$ – в'язкопружне ядро релаксації, що представлено рядами Проні; $\gamma^2 = C_{22}/C_{11}$.

Граничні умови та умови спряженості, що стоять в правій системі виразів (9), зокрема друге з цих умов, включають в себе можливість моделювання особливостей монтажу бандажа на трубопровід, що регулюється за допомогою параметра Δu_r .

При розв'язанні задачі ортотропної в'язкопружності друге з рівнянь в системі (8) для випадку виразу ядер релаксації одночленовими рядами Проні записється

$$\left[\frac{d^2 u_r^{(II)}(r, t)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du_r^{(II)}(r, t)}{dr} - \gamma^2 \frac{u_r^{(II)}(r, t)}{r^2} \right] - a_{11} * \quad (10)$$

$$* \int_0^t \left[\frac{d^2 u_r^{(II)}(r, \xi)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du_r^{(II)}(r, \xi)}{dr} - \gamma^2 \mu^2 \omega^2(t - \xi) \frac{u_r^{(II)}(r, \xi)}{r^2} \right] \exp(-b_{11}(t - \xi)) d\xi = 0,$$

де a_{ij} – множники рядів Проні; $b_{ij} = 1 / \tau_{ij}$ – показники рядів Проні; τ_{ij} – часи релаксації рядів Проні; $\mu^2 = a_{22}/a_{11}$; $\omega^2(t) = \exp(-b_{22}t)/\exp(-b_{11}t)$.

Для його розв’язання застосовується метод побудови інтегральних квадратурних формул для рівномірних сіток, і після ряду алгебраїчних перетворень воно набуває вигляду

$$\left[(1 - a_{11} D_s) \frac{d^2 u_{r,s}}{dr^2} + (1 - a_{11} D_s) \frac{1}{r} \frac{du_{r,s}}{dr} - (1 - a_{11} D_s \mu^2) \gamma^2 \frac{u_{r,s}}{r^2} \right] = \quad (11)$$

$$= a_{11} \sum_{s=0}^{S-1} D_s \left[\frac{d^2 u_{r,s}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du_{r,s}}{dr} - \gamma^2 \mu^2 \omega^2(t_s - t_s) \frac{u_{r,s}}{r^2} \right] \exp(-b_{11}(t_s - t_s)),$$

де D_s – квадратурні множники; ξ_s – точки сітки; S – кількість точок сітки.

Разом із іншими частинами крайової задачі рівняння (11) формує ітеративну схему, після реалізації якої вона стає повністю розв’язаною.

З метою врахування дефекту в стінці трубопроводу та дослідження впливу бандажування на зменшення концентрації напружень в місці його розташування застосовується метод скінченних елементів у тривимірній постановці (рис. 12), а для моделювання ортотропії в’язкопружності бандажа використовується розроблений в роботі метод накладених сіток, що дає можливість задавати непропорційні одна одній криві релаксації параметрів в’язкопружності та є збіжним при розв’язанні даної задачі.

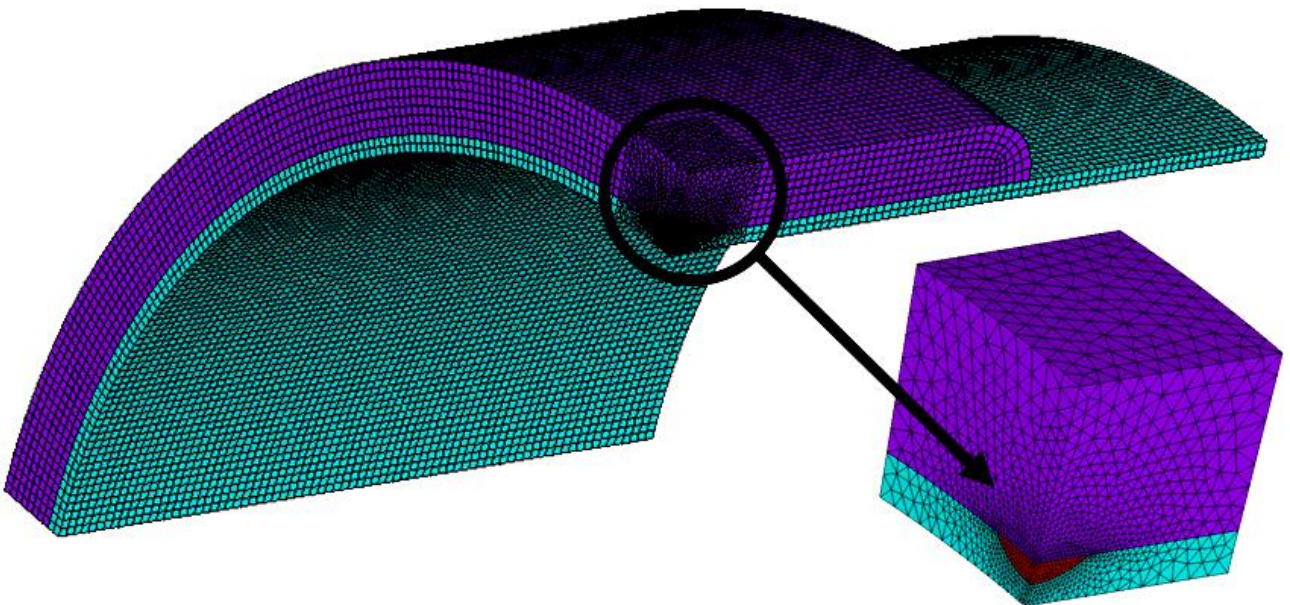


Рисунок 12 – Скінченно-елементна модель ділянки трубопроводу із ремонтним бандажем

Була розв'язана задача в'язкопружності та побудовані криві релаксації еквівалентних за Мізесом напружень в бандажі (рис. 13, а) та їхнього збільшення в місці дефекту (рис. 13, б).

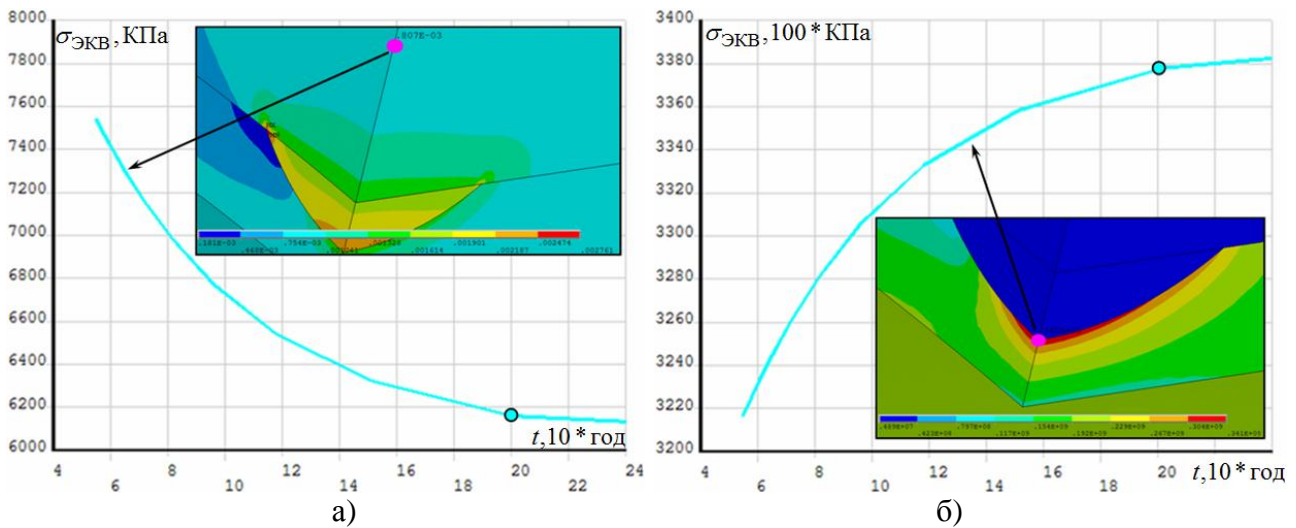


Рисунок 13 – Зміна у часі еквівалентних за Мізесом напружень в бандажі (а) та місці дефекту у трубопроводі (б)

В ході аналізу результатів розрахунків встановлено, що у порівнянні із небандажованим трубопроводом ремонт у випадках ортотропного пружного, ізотропно в'язкопружного та ортотропно в'язкопружного бандажів знижує максимальні еквівалентні за Мізесом напруження в місці дефекту на 37 %, 28 % та 17 % відповідно при значенні цього параметру у 439 МПа для випадку небандажованої труби.

Також було проведено порівняння пружних та в'язкопружних показників напружено-деформованого стану бандажованої ділянки трубопроводу, визначених за допомогою аналітичної, чисельно-аналітичної та скінченно-елементної об'ємної моделей. Для випадку тривимірного скінченно-елементного розрахунку вони вимірювались в точках, максимально віддалених від переходу з бандажованої ділянки трубопроводу на небандажовану, для уникнення впливу крайового ефекту на результати вимірювань. Похибка між аналітичними та скінченно-елементними методами всюди є нижчою за максимально допустимий рівень, який складає 2%, що підтверджує коректність виконаного моделювання.

У додатках наведено список публікацій здобувача за темою дисертації, акти впровадження результатів дисертації в науково-виробничу практику вітчизняного промислового підприємства ТОВ «ІТЦ «Донвентилятор» та в науково-дослідні роботи в рамках міжнародного проекту INNOPIPES і держбюджетної теми МОН України «Розробка методів математичного моделювання поведінки нових та композиційних матеріалів для оцінки ресурсу та прогнозування надійності елементів конструкцій», а також комп'ютерні програми для реалізації процедури розв'язання інтегральних рівнянь та аналітичної і чисельно-аналітичної моделей напружено-деформованого стану контактуючої ділянки пружного трубопроводу із в'язкопружним ремонтним бандажем.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичну задачу визначення та моделювання анізотропних в'язкопружних властивостей полімерних армованих композиційних матеріалів при розв'язанні задач контактної механіки елементів конструкцій і машин, виконаних з них, а саме:

1. Розглянуто приклади використання композиційних матеріалів в високонавантажених елементах сучасних конструкцій і машин та прояву ними анізотропних в'язкопружних властивостей, а також основні підходи до знаходження параметрів таких властивостей та проведено аналіз існуючих методів моделювання контактної механічної поведінки анізотропних пружних та в'язкопружних композиційних елементів, що дозволило встановити перспективні шляхи для розробки методів їхнього розрахунку.

2. Запропоновано метод накладених сіток для моделювання анізотропних в'язкопружних властивостей матеріалів в програмних комплексах скінченно-елементного аналізу, що має допустиму інженерну похибку та незначний вплив на загальну продуктивність скінченно-елементної процедури, є збіжним та застосовним до моделювання контактної механічної поведінки анізотропних в'язкопружних тіл за допомогою методу скінченних елементів.

3. На основі структурного методу дослідження механічних властивостей армованих композиційних матеріалів розроблено чисельну методику отримання табличних залежностей ортотропних в'язкопружних властивостей полімерного ортогонально армованого композиту від часу та температури за наявними ізотропними пружними властивостями волокон та ізотропними в'язкопружними властивостями епоксидної матриці. Це дозволило розраховувати його коефіцієнти тензору релаксації та технічні в'язкопружні параметри, провести апроксимацію отриманих залежностей, проаналізувати відмінності коефіцієнтів тензору релаксації та технічних в'язкопружних параметрів та встановити рівень анізотропії в'язкопружних властивостей, що спричинений двоспрямованим армуванням композиційного матеріалу. Окрім того, встановлено, що характер та параметри температурної зсувної функції армованих композитів кількісно та якісно співпадають із характером та параметрами зсувної функції полімерної матриці.

4. Проведено експериментальне дослідження ортотропних в'язкопружних властивостей склотекстоліту, побудовано його діаграми розтягування та криві повзучості, на їхній основі знайдено табличні та апроксимовані залежності кривих релаксації компонентів тензору релаксації та технічних в'язкопружних параметрів, а також оцінено рівень анізотропії в'язкопружності композиту, який якісно співпадає із результатами, отриманими за допомогою структурного методу дослідження, що доводить адекватність проведених експериментів.

5. На прикладі розгляду задачі навантаження внутрішнім тиском ділянки магістрального трубопроводу, посиленого ремонтним бандажем, розроблено методику розв'язання контактних задач анізотропної в'язкопружності композиційних елементів конструкцій і машин та створено їхні аналітичну, чисельно-аналітичну та об'ємну скінченно-елементну розрахункові моделі із застосуван-

ням запропонованих методів моделювання анізотропії в'язкопружних властивостей в аналітичних співвідношеннях та програмних комплексах скінченно-елементного аналізу. Визначено, що ремонт трубопроводу за допомогою пружного бандажа знижує рівень небезпечних напружень в місці дефекту на 37 %, а в разі врахування ефектів ізотропної та ортотропної в'язкопружності склопластику цей ефект зменшується до 28 % та 17 % відсотків відповідно.

6. Позитивні результати використання створених моделей ортотропної в'язкопружності композиційних матеріалів при моделюванні механіки композиційних елементів конструкцій і машин (ТОВ «ІТЦ «Донвентилятор», м. Харків) довели високу технічну та економічну доцільність запропонованих методик. Результати дисертаційної роботи використано при виконанні окремих етапів науково-дослідних робіт відповідно до завдань науково-дослідного проєкту INNOPIPES та держбюджетної теми МОН України «Розробка методів математичного моделювання поведінки нових та композиційних матеріалів для оцінки ресурсу та прогнозування надійності елементів конструкцій».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Мартиненко В.Г., Львов Г.І. Особливості моделювання та аналізу ділянок трубопроводів з експлуатаційними дефектами та в'язкопружними ремонтними накладками. Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Серія: Динаміка і міцність машин. 2013. № 63 (1036). С. 81-90.

Здобувачем побудовано тривимірну скінченно-елементну модель ділянки трубопроводу з дефектом в його стінці та в'язкопружним бандажем та проведено розрахунки напружено-деформованого стану в конструкції.

2. Мартиненко В.Г., Львов Г.І. Аналітичне дослідження контактної поведінки ділянки трубопроводу з в'язкопружною ремонтною накладкою. Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Серія: Динаміка і міцність машин. 2014. № 57 (1099). С. 49-56.

Здобувачем побудовано аналітичну плоску вісесиметричну модель контакту пружного трубопроводу із в'язкопружним бандажем та проведено варіантні розрахунки напружено-деформованого стану в моделі.

3. Мартиненко В.Г., Львов Г.І. Чисельно-аналітичне дослідження ортотропної в'язкопружності склопластику на прикладі ремонтної накладки магістрального трубопроводу. Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Серія: Динаміка і міцність машин. 2014. № 58 (1100). С. 68-77.

Здобувачем розроблено чисельно-аналітичний метод розв'язання інтегродиференційної крайової задачі для опису плоского вісесиметричного напружено-деформованого стану пружного трубопроводу із ортотропним в'язкопружним бандажем та проведено порівняльний аналіз отриманих результатів із результатами, визначеними за аналітичною моделлю.

4. Мартиненко В.Г., Львов Г.І. Аналіз напружено-деформованого стану трубопроводу з в'язкопружним ремонтним бандажем на різних робочих режимах. Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія: Машинобудування. 2015. № 1 (73). С. 22-28.

Здобувачем розроблено метод врахування особливостей монтажу ремонтного бандажа на навантажений внутрішнім тиском трубопровід із натягом, що може бути застосований до попередньо розроблених аналітичної та чисельно-аналітичної моделей плоского вісесиметричного напружено-деформованого станів пружного трубопроводу із в'язкопружним бандажем.

5. Мартиненко В.Г. Методика експериментального дослідження в'язкопружних властивостей ортотропного матеріалу. Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Серія: Динаміка і міцність машин. 2015. № 57 (1166). С. 81-87.

6. Мартиненко В.Г., Львов Г.І. Чисельна методика визначення анізотропних в'язкопружних властивостей ортогонально армованого композиційного матеріалу. Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Серія: Динаміка і міцність машин. 2016. № 46 (1218). С. 44-51. (DOI: <http://doi.org/10.20998/2078-9130.2016.46.88049>).

Здобувачем побудовано чисельну методику визначення анізотропних в'язкопружних властивостей ортогонально армованого композиційного матеріалу та проведено розрахунки параметрів ортотропної в'язкопружності склопластику.

7. Martynenko V.G., Lvov G.I. Numerical prediction of temperature dependent anisotropic viscoelastic properties of fiber reinforced composite. Journal of Reinforced Plastics and Composites. 2017. Vol. 36, Is. 24. P. 1790-1801.

Здобувачем вдосконалено попередньо розроблену методику визначення анізотропних в'язкопружних властивостей ортогонально армованого композиційного матеріалу для врахування їхніх температурних залежностей та проведено розрахунки параметрів ортотропної в'язкопружності вуглепластику, залежних від часу та температури.

8. Martynenko V.G. An original technique for modeling of anisotropic viscoelasticity of orthotropic materials in finite element codes applied to the mechanics of plates and shells. Mechanics and Mechanical Engineering. 2017. Vol. 21, No. 2. P. 389-413.

9. Мартиненко В.Г., Львов Г.І. Огляд методів розв'язання контактних задач в'язкопружних композиційних оболонок. Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Серія: Динаміка і міцність машин. 2017. № 39 (1261). С. 32-48.

Здобувачем виконано аналіз існуючих методів розв'язання контактних задач в'язкопружних композиційних елементів конструкцій і машин.

10. Мартиненко В.Г., Львов Г.І. Дослідження напружено-деформованого стану трубопроводу в місці ремонтної накладки. VIII Університетська науково-практична студентська конференція магістрантів Національного технічного

університету «Харківський політехнічний інститут»: тези доповідей у 3-х частинах, м. Харків, 22-24 квітня 2014 р. Харків: НТУ «ХПІ», 2014. Ч. 1, С. 85-86.

Здобувачем побудовано аналітичну плоску вісесиметричну модель контакту пружного трубопроводу із пружним бандажем

11. Мартиненко В.Г., Львов Г.І. Порівняльний аналіз аналітичних та чисельних досліджень напружено-деформованого стану бандажованого трубопроводу з дефектом в стінці. Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXII міжнародної науково-практичної конференції у 4-х частинах, м. Харків, 15-17 жовтня 2014 р. Харків: НТУ «ХПІ», 2014. Ч. 1, С. 59.

Здобувачем проведено порівняльні дослідження результатів розрахунку параметрів напружено-деформованого стану, отриманих за тривимірною скінченно-елементною моделлю ділянки трубопроводу з дефектом в його стінці та бандажем, із пружним аналітичним розв'язком.

12. Martynenko V.G., Lvov G.I. Development of an analytical model of viscoelastic behavior of a repair bandage of a pipeline. Безразрушительн контрол в съвременната индустрия: тези доповідей міжнародної конференції, м. Софія, 3-5 лютого 2015 р. Софія, 2015. С. 128-133.

Здобувачем вдосконалено попередньо побудовані аналітичний та чисельно-аналітичний методи моделювання напружено-деформованого стану ділянки пружного трубопроводу із в'язкопружним бандажем та зроблено порівняння результатів, отриманих у відповідності з ними.

13. Мартиненко В.Г., Львов Г.І. Дослідження впливу в'язкопружності на напружено-деформований стан бандажованої ділянки трубопроводу. ІХ Міжнародна науково-практична студентська конференція магістрантів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»: тези доповідей у 4-х частинах, м. Харків, 07-09 квітня 2015 р. Харків: НТУ «ХПІ», 2015. Ч. 1, С. 99-100.

Здобувачем проведено дослідження впливу врахування явища в'язкопружності на результати визначення напружено-деформованого стану ділянки трубопроводу із ремонтним бандажем.

14. Мартиненко В.Г. Аналітична модель механічної поведінки трубопроводу із посилюючим композитним бандажем. Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXIII міжнародної науково-практичної конференції у 4-х частинах, м. Харків, 20-22 травня 2015 р. Харків: НТУ «ХПІ», 2015. Ч. 1, С. 55.

15. Martynenko V.G., Lvov G.I. Contact problem of anisotropic viscoelasticity of two cylindrical shells. Innovative Solutions in Repair of Gas and Oil Pipelines, Sofia: Bulgarian Society for Non-destructive Testing Publishers, 2016. P. 159-171.

Здобувачем застосовано попередньо розроблений метод врахування особливостей монтажу ремонтного бандажу на навантажений внутрішнім тиском трубопровід із натягом до розв'язання прикладних задач та досліджено вплив різних режимів ремонту ділянки трубопроводу на його ефективність.

16. Мартиненко В.Г. Експериментальне дослідження анізотропії в'язкопружних властивостей композиційного матеріалу. Інформаційні техноло-

гії: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXIV міжнародної науково-практичної конференції у 4-х частинах, м. Харків, 18-20 травня 2016 р. Харків: НТУ «ХП», 2016. Ч. 1, С. 65.

17. Мартиненко В.Г. Аналітичний метод розв'язання двовимірної задачі ортотропної в'язкопружності. Сучасні проблеми машинобудування: тези доповідей конференції молодих вчених та спеціалістів, м. Харків, 21-24 листопада 2016 р. Харків: ІПМаш ім. А.М. Підгорного НАН України, 2016. С. 13.

18. Мартиненко В.Г., Львов Г.І. Скінченно-елементний підхід до знаходження анізотропних в'язкопружних характеристик композиційного матеріалу. XI Міжнародна науково-практична конференція магістрантів та аспірантів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»: тези доповідей у 3-х частинах, м. Харків, 18-21 квітня 2017 р. Харків: НТУ «ХП», 2017. Ч. 1, С. 33-34.

Здобувачем проведено серію чисельних експериментів над представницьким об'ємом ортогонально армованого композиційного матеріалу та отримані його модулі Юнга.

19. Мартиненко В.Г. Підхід до моделювання анізотропії в'язкопружності в комплексах скінченно-елементного аналізу. Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXV міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2017 у 4-х частинах, м. Харків, 17-19 травня 2017 р. Харків: НТУ «ХП», 2017. Ч. 1, С. 72.

20. Мартиненко В.Г., Львов Г.І. Метод моделювання анізотропних в'язкопружних властивостей композиційних елементів машин. XII Міжнародна науково-практична конференція магістрантів та аспірантів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»: тези доповідей у 3-х частинах, м. Харків, 17-20 квітня 2018 р. Харків: НТУ «ХП», 2018. Ч. 3, С. 188-189.

Здобувачем створено новий метод моделювання анізотропних в'язкопружних властивостей матеріалів в програмних комплексах скінченно-елементного аналізу.

21. Мартиненко В.Г. Дослідження ортотропії в'язкопружних властивостей склопластику при підвищених температурах. Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXVI міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2018 у 4-х частинах, м. Харків, 16-18 травня 2018 р. Харків: НТУ «ХП», 2018. Ч. 1, С. 58.

22. Мартиненко В.Г. Розв'язування контактної задачі в'язкопружності для ортотропної оболонки за допомогою методу накладених сіток. Сучасні проблеми механіки та математики: тези доповідей міжнародної конференції у 3-х томах, м. Львів, 22-25 травня 2018 р. Львів: ІППММ ім. Я. С. Підстригача НАН України, 2018. Т. 2, С. 57-58.

23. Мартиненко В.Г. Застосування методу накладених сіток до розв'язання задач анізотропної в'язкопружності. Актуальні проблеми інженерної механіки: тези доповідей V міжнародної науково-практичної конференції, м. Одеса, 22-25 травня 2018 р. Одеса: ОДАБА, 2018. С. 156-158.

АНОТАЦІЇ

Мартиненко В.Г. Розробка методів розрахунку елементів конструкцій із в'язкопружних композиційних матеріалів. 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, 2018 р.

Дисертацію присвячено створенню нових методів опису та моделювання анізотропної в'язкопружності композиційних елементів конструкцій і машин.

На підставі аналізу актуальних методик встановлено, що на даний момент не існує комплексного підходу до встановлення параметрів анізотропної в'язкопружності полімерних армованих композиційних матеріалів, а також моделювання їхньої механічної поведінки. З метою визначення властивостей в'язкопружного композиту був розроблений чисельний метод гомогенізації ядер ортотропної в'язкопружності ортогонально армованого композиційного матеріалу. Спланований та реалізований експеримент зі знаходження параметрів анізотропної в'язкопружності склотекстоліту кількісно та якісно підтвердив результати чисельних розрахунків, що продемонструвало необхідність врахування в'язкопружних властивостей із загальним ступенем анізотропії при моделюванні механіки елементів конструкцій і машин, виконаних із полімерних армованих композиційних матеріалів. Запропонований в роботі метод накладених сіток надав до цього моменту відсутні можливості моделювання будь якого ступеня анізотропії в'язкопружних властивостей в програмних комплексах скінченно-елементного. Цей метод в роботі був застосований до моделювання контакту ділянки пружного трубопроводу із ортотропним в'язкопружним ремонтним бандажем за допомогою тривимірної в'язкопружної скінченно-елементної моделі, що в порівнянні із розробленими аналітичною та чисельно-аналітичною моделями плоского вісесиметричного напружено-деформованого стану такої конструкції показало його адекватність та високу точність.

Ключові слова: конструкційна міцність, статичне навантаження, експериментальний метод, анізотропна в'язкопружність, композиційний матеріал, терморелеологічно простий матеріал, ряд Проні, зсувна функція, апроксимація, структурний метод, ремонтний бандаж, контактна задача, аналітична модель, чисельно-аналітичний метод, метод скінченних елементів.

Мартыненко В.Г. Разработка методов расчёта элементов конструкций из вязкоупругих композиционных материалов. 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», 2018 г.

Диссертация посвящена созданию новых методов описания и моделирования анизотропной вязкоупругости композиционных элементов конструкций.

На основании анализа актуальных методик установлено, что в настоящее время не существует комплексного подхода к установлению параметров ани-

зотропной вязкоупругости полимерных армированных композиционных материалов и моделирования их механического поведения. С целью определения свойств вязкоупругого композита был разработан численный метод гомогенизации ядер ортотропной вязкоупругости ортогонально армированного композиционного материала. Спланированный и реализованный эксперимент по нахождению параметров анизотропной вязкоупругости стеклотекстолита количественно и качественно подтвердил результаты численных расчетов, что продемонстрировало необходимость учета вязкоупругих свойств с общей степенью анизотропии при моделировании механики элементов конструкций и машин, выполненных из полимерных армированных композиционных материалов. Предложенный в работе метод наложенных сеток предоставил к этому моменту отсутствующие возможности моделирования любой степени анизотропии вязкоупругих свойств в программных комплексах конечно-элементного анализа. Этот метод в работе был применен к моделированию контакта участка упругого трубопровода с ортотропным вязкоупругим ремонтным бандажом с помощью трехмерной вязкоупругой конечно-элементной модели, что в сравнении с разработанными аналитической и численно-аналитической моделями плоского осесимметричного напряженно-деформированного состояния такой конструкции показало его адекватность и высокую точность.

Ключевые слова: конструкционная прочность, статическое нагружение, экспериментальный метод, анизотропная вязкоупругость, композиционный материал, терморезологически простой материал, ряд Прони, сдвиговая функция, аппроксимация, структурный метод, ремонтный бандаж, контактная задача, аналитическая модель, численно-аналитический метод, метод конечных элементов.

Martynenko V.G. Development of methods for calculation of constructional elements of viscoelastic composite materials. Manuscript.

Thesis for granting the Degree of Candidate of Technical sciences in speciality 05.02.09 – Dynamics and Strength of Machines. – National Technical University «Kharkiv Politechnical Institute», 2018.

The thesis is dedicated to a creation of new methods for describing and modeling the anisotropic viscoelasticity of composite structural elements.

Basing on an analysis of actual methods it is established that at the moment there is no a complex approach for determining anisotropic viscoelastic parameters of polymer reinforced composite materials and modeling their mechanical behavior. With a purpose of finding the quantitative and qualitative properties of a viscoelastic composite, a numerical method for homogenizing orthotropic viscoelastic kernels of orthogonally reinforced composite material, that are dependent on a fiber volume fraction, time and temperature, was developed. The time dependencies of these kernels were approximated by Prony series, whereas the temperature ones were approximated by Williams-Landel-Ferry shift function. This approach allowed to indicate that the viscoelasticity of fiber reinforced polymeric composite materials is of orthotropic nature for an orthogonal reinforcement scheme, that the relaxation curves of

viscoelastic parameters are not similar to each other, which contradicts the classical engineering viscoelastic models, and that the temperature dependency of these properties coincide with the ones of the composite polymeric matrix. The planned and realized experiment on finding the parameters of anisotropic viscoelasticity of a fiberglass with a woven reinforcement scheme has confirmed the results of numerical calculations, which demonstrated the need to take into account viscoelastic properties with a general degree of anisotropy when modeling the mechanics of structural elements and machines made of fiber reinforced polymeric composite materials. The experiment rig was improved during the research in order to satisfy the requirements for carrying out tests on plane polymeric composite samples. The method of superimposed meshes proposed in the work provided the possibilities of modeling any degree of anisotropy of viscoelastic properties in commercial finite-element codes without a necessity to create additional material user subroutines using only the standard tools of these codes. The convergence of the method was also proved in the work. This method was applied to modeling a contact behavior of an elastic pipeline section with an orthotropic viscoelastic repair bandage using a three-dimensional viscoelastic finite element model that in comparison with the developed analytical and numerical-analytical models of a plane axisymmetric stress-strain state of such a design showed its adequacy and accuracy. In addition, proposed analytical and numerical-analytical methods allowed to take into account mounting features of repair bandage assembled on unloaded or loaded pipeline with or without tension, that enabled to indicate a relaxation of contact stresses for different repair regimes.

Key words: structural strength, static load, experimental method, anisotropic viscoelasticity, composite material, thermorheologically simple material, Prony series, shift function, approximation, structural method, repair bandage, contact problem, analytical model, numerical-analytical method, finite-element method.



Підписано до друку 10.09.2018 р.
Формат 60x84/16. Папір офсетний.
Друк цифровий. Умовн. друк. арк. 0,9
Гарнітура Times New Roman. Наклад 100 прим. Замовлення № 18091001

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
