

ПРОГНОЗУВАННЯ НАДІЙНОСТІ ГУМО-КОРДНИХ ВИСОКОНАПІРНИХ МУФТ ТРУБОПРОВОДІВ

В роботі розглянуто питання математичного моделювання деформування багат шарової гумо-кордної компенсаторної муфти трубопроводів. Дослідження проведено в рамках методу скінчених елементів із застосуванням процедури ітеративного субмоделювання. Представлено математичну модель оцінки накопичення втомної пошкоджуваності в даній конструкції, яка враховує можливу варіацію напружень в процесі експлуатації, а також процеси зміни характеристик опору втомі в матеріалах внаслідок природного старіння. Моделювання представлено в імовірнісній постановці. Отримано оцінки щодо надійності муфти.

Ключові слова: надійність, континуальна пошкоджуваність, МСЕ, гумо-кордні напірні муфти.

OLEKSIY LARIN

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"

A RELIABILITY ANALYSIS OF RUBBER-CORD HIGH-PRESSURE PIPELINES CONNECTIONS

The paper deals with the mathematical modelling of deformation of the multilayer rubber-cord compensatory coupling of high-pressure pipes. The study has carried out on the base of finite element method using the iterative sub-modelling procedure. The models in three different scales have developed. The first model presents a general design with homogeneous orthotropic properties of reinforced ply. The last model presents a representative volume of pipe in the most deformed part and directly takes into account fibers in the composite ply. Such modelling allows to identify an internal stress and strain concentration in the most deformed part of the design. The mathematical model is presented for evaluating the accumulation of fatigue damage in this compensatory coupling. It takes into account the possible variation of stresses during operation, and processes of the reduction of fatigue resistance in rubber material of pipe as a result of aging. The modelling presented in a probabilistic statement, i.e. the amplitudes of stresses is set as random stationary process and the fatigue strength parameters of material are also set as random process. Analytical formulations have been found for probability density function of continuum damage parameter and integral representation for a probability of non-failure operation of the design. An assessment of the reliability of compensatory rubber-cord coupling of pipes has been analysed.

Keywords: reliability, continuum damage parameter, FEM, compensatory rubber-cord coupling of pipes.

Вступ

Багат шарові товстостінні труби з криволінійною геометрією, які виготовлені з губоподібних матеріалів широко використовуються в сучасній техніці. Наприклад, це компенсаторні гумові муфти трубопроводів, які застосовуються для з'єднання елементів трубопроводних систем, зокрема і частин, що знаходяться під «незручним кутом». Іншим прикладом є елементи напірних рукавів та шлангів, що застосовуються для перекачування пульпи, суспензій, абразивних сумішей та рідин під високим тиском, зокрема в системах гідравліки різних машин та механізмів.

З багатьох досліджень, що наведені в літературі відомо, що для різних шлангів, відводів та труб найпоширенішими типами відмов є пошкодження, що з'являються на поверхні [1] або між шарами шлангів [2, 3]. Дослідження показали, що в багат шарових шлангах відносно слабка між-фазна міцність, і в наслідок дії навантажень з'являються внутрішні початкові тріщини, які поступово переростають в зовнішній гумовий шар, що приводить до остаточного розриву [2, 3]. Узагальнюючи наведені дані, можна стверджувати, що робота механічних об'єктів, що вивчаються, як правило, відбувається при динамічному (циклічному) навантаженні, що призводить до накопиченню втомі в матеріалах.

Питанням оцінки характеристик опору втомі для різних матеріалів приділяється багато уваги в літературі, зокрема і питанням прогнозування втомної довговічності у губоподібних матеріалах [4]. Тут слід зазначити, що відомі експериментальні дані по залежностям кількості циклів до відмови від параметрів НДС вказують на те що завжди існує досить суттєвий статистичний розкид у визначенні матеріальних констант [5]. Отже, оцінка втомної довговічності реальних машинобудівних елементів конструкцій повинна враховувати наявність відповідного розкиду. Більше того експлуатація даних елементів конструкцій спряжена з протіканням деградаційних процесів в гумових матеріалах, які викликані хіміко-фізичними перетвореннями в матеріалі в наслідок впливу зовнішнього середовища та не пов'язані із навантаженням (старіння) [6]. Відповідні процеси суттєво впливають на поведінку матеріалу, зокрема істотно зменшують характеристики міцності за період часу, що є співставним із ресурсом по втомі. Звичайно, що попередній випадковий розкид експериментальних даних з часом в наслідок старіння не зникає.

Таким чином, при оцінці надійності відповідних елементів конструкцій існує необхідність одночасного врахування протікання процесів старіння та накопичення втомі враховуючи наявність випадкового розкиду характеристик опору втомі матеріалів. Крім того, є очевидним, що реальна експлуатація конструкцій має випадкову варіацію навантаження, яку слід враховувати при оцінці надійності конструкцій, взагалі і для гумових шлангів зокрема.

В даній роботі розглянуто підхід до оцінки експлуатаційної надійності багат шарових товстостінні труб криволінійної геометрії, які виготовлені з гумових матеріалів посилені текстильним кордом та використовуються як компенсаторні гумові муфти високонапірних трубопроводів.

Постановка задачі

В даній роботі розглядається задача прогнозування надійності гумо-кордної муфти трубопроводів високого тиску. У загальному виді оцінка надійності складається з трьох послідовних етапів: визначення характеристик НДС в умовах експлуатації, формування критерію відмови, що відповідає найбільш вірогідній причині можливих відмов системи та власне самої задачі визначення надійності, яка полягає у розрахунку ймовірності безвідмовної роботи конструкції, як функції часу. На рис. 1 представлена схема розв'язання задачі надійності, що умовно розділена на три етапи.

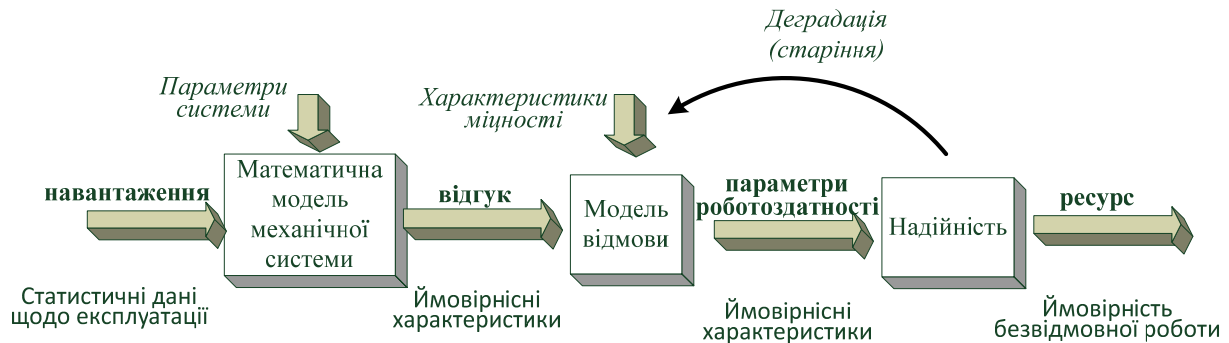


Рис. 1. Схема вирішення задачі надійності

В даній роботі **перший етап**, який полягає у визначенні відгуку системи на експлуатаційне навантаження, вирішується в рамках методу скінчених елементів (МСЕ). Задача розв'язується у статичній нелінійній детермінованій постановці в рамках тривірневого субмоделювання, яке дозволяє оцінити рівень внутрішньої концентрації деформацій в гумовій матриці композитного шару конструкції, який є основним несучим елементом конструкції. Слід зауважити, що реальні умови експлуатації пов'язані з наявністю випадкових пульсацій тиску. В даній роботі пропонується вважати, що напруження якісно повторюють особливості пульсацій внутрішнього тиску, частота яких значно менша за першу власну частоту конструкції.

На **другому етапі**, в даній роботі пропонується математична модель, що за відомих характеристик НДС дозволяє прогнозувати випадковий розвиток континуальної пошкоджуваності втоми, яка явним чином враховує одночасне протікання процесу природного старіння еластостійкого матеріалу.

Деградація властивостей моделюється як процес скорочення межі втоми в часі. Кінетика росту пошкоджуваності представлена в рамках концепції ефективних напружень.

На останньому **третьому етапі** вирішується задача визначення ймовірності безвідмовної роботи муфти за відомими ймовірнісними характеристиками процесу накопичення пошкоджуваності втоми в муфті, які формуються внаслідок випадкової за амплітудою квазістатичної циклічної пульсації навантаження та з урахуванням одночасного протікання процесу старіння гумової матриці композита.

Скінчено-елементне моделювання компенсаторної гумової муфти та оцінка характеристик її НДС в експлуатації

Об'єктом, що досліджується є сектор торіодальної труби (рис. 2), який має багат шарову структуру, що складається з трьох шарів гуми, середній з яких армований текстильним кордом. Геометрична модель була створена шляхом протягування попередньо утвореного перерізу труби по заданому напрямку (по дузі заданого радіуса).

З практики моделювання та з оцінок представлених в літературних джерелах відомо, що під дією зовнішнього навантаження гумові матеріали в даній конструкції здатні відтворювати істотні деформації, що призводить до необхідності враховувати геометричну та фізичну нелінійність при їх моделюванні [7].

Аналіз НДС проводився в рамках методу скінчених елементів. Для цього було нанесено регулярну СЕ сітку гексагональних твердотільних тривимірних елементів з 8 вузлами та 3-а ступенями вільності у вузлі. Наявність неоднорідності внутрішньої структури (посилення кордом) призводить з одного боку до ортотропії пружних властивостей певних частин цих конструкцій, а з іншого боку суттєво ускладнює аналіз напруженого стану оскільки відповідна неоднорідність призводить до наявності зон внутрішньої концентрації напружень. Врахувати явним чином наявність корду є майже неможливим оскільки це істотно збільшує розмірність нелінійної задачі, що призводить до поганої збіжності чисельних процедур пошуку розв'язку.

Для вирішення вище зазначених проблем, в даній роботі запропоновано використати метод субмоделювання. Відповідно до підходу задача розв'язується у декілька етапів. На першому етапі проводиться розрахунок повної моделі з досить грубою СЕ сіткою, яка не дає достовірної картини НДС, але є достатньою для отримання якісної картини загального деформування (переміщень точок конструкції).

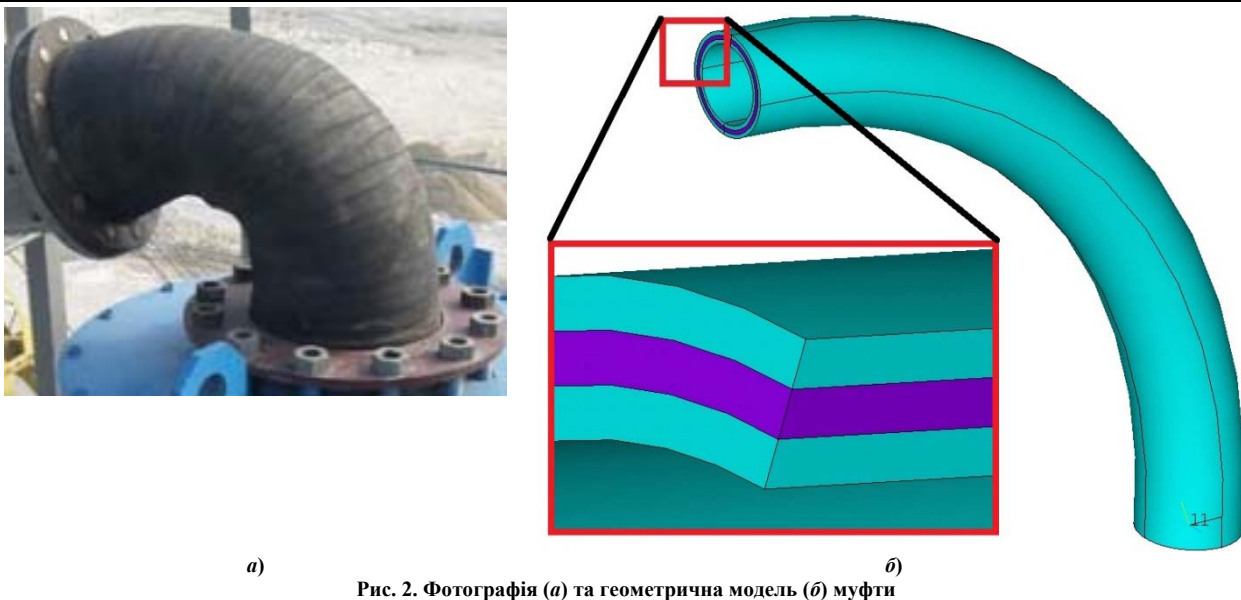


Рис. 2. Фотографія (а) та геометрична модель (б) муфти

На другому етапі, з повної розрахункової моделі вилучається певна її частина, яка має більш дрібну сітку. В якості додаткових кінематичних граничних умов використовуються результати розрахунків по переміщенням, що були отримані на попередньому етапі моделювання. Це дозволяє отримати більш точні результати по напруженням і деформаціям для частини конструкції, не збільшуючи розмірності повної моделі. В даній роботі застосовується додатково ще й третій етап на якому з вже зменшеної частини конструкції було виділено презентативний об'єм навколо найбільш навантаженої частини конструкції. В рамках моделі даного рівня було побудовано явним чином кордні елементи, що дозволяє оцінити рівень внутрішньої концентрації деформацій в композиті, яка формується внаслідок неоднорідності його структури.

На рис. 3 представлено скінчено-елементні моделі для всіх рівнів субмоделювання.

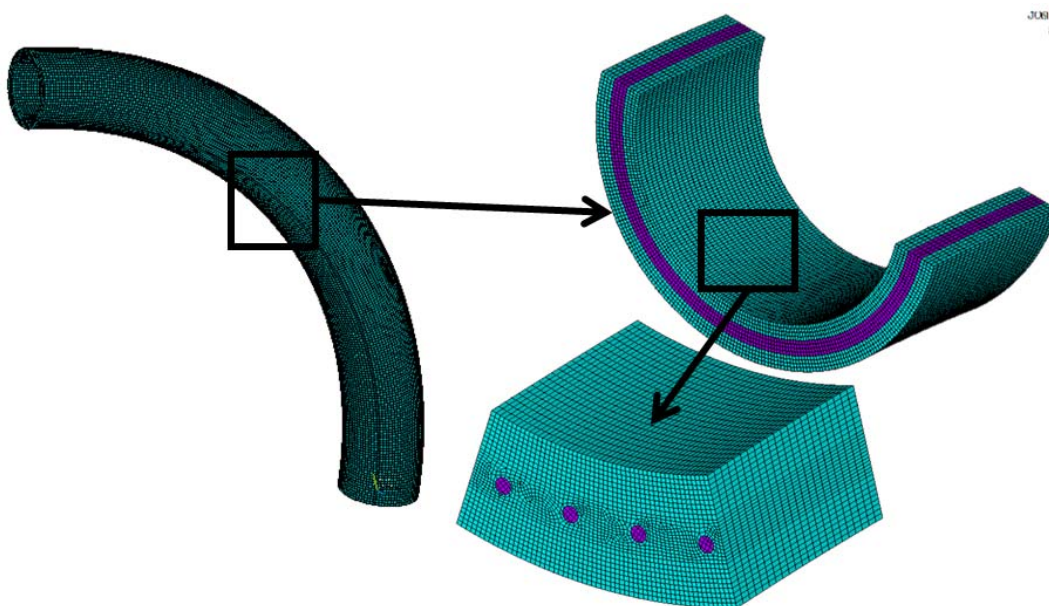


Рис. 3. СЕ моделі різних рівнів субмоделювання

Таким чином, на першому етапі розглядалась повна модель: сектор труби-муфти. Границі сектору було жорстко зафіксовано. В якості навантаження було прикладено рівномірно розподілений внутрішній тиск. Проблема була вирішена в пружній нелінійній постановці в рамках теорії великих деформацій. Гумові шари розглядались відповідно до неогуківської моделі гіперпружного деформування. Для середнього шару було встановлено усереднені ортотропні пружні властивості відповідно до узагальненого закону Гука в тороїдальній системі координат. На другому етапі субмоделювання в рамках тих самих гіпотез було розглянуто лише частину сектору муфти на яку в якості додаткових граничних умов було накладено переміщення по границям відкинutoї частини тіла та які були визначені при попередньому моделюванні. Результати цих розрахунків наведені на рис. 4. Максимальні деформації, що було визначено зосереджені на внутрішньому шарі триби-муфти і складають майже 16%. Максимальні еквівалентні напруження в гумових

шарах спостерігаються також на внутрішньому шарі та складають 0,6 МПа.

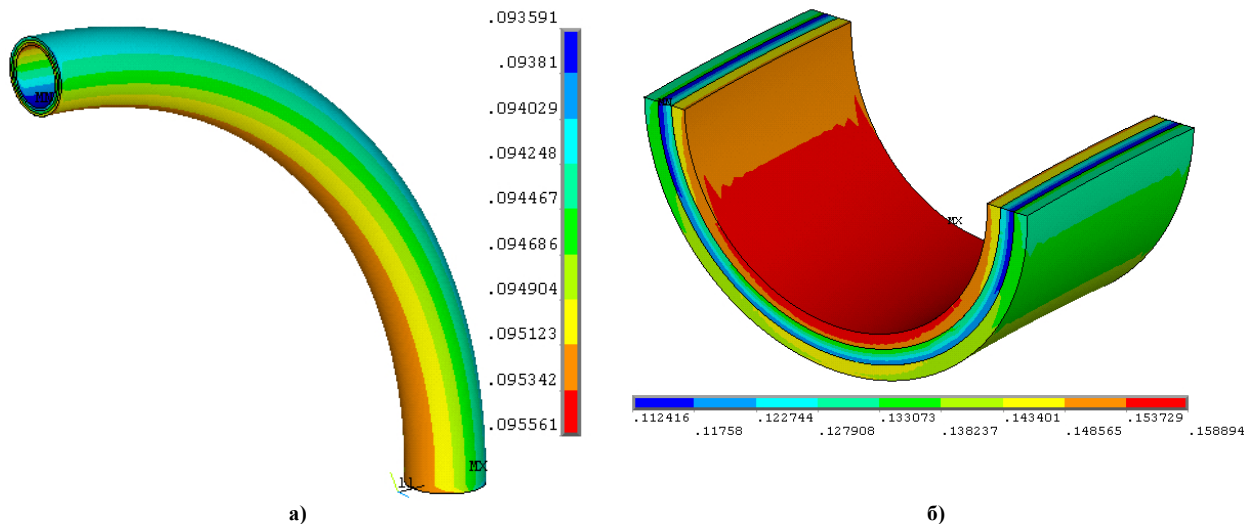


Рис. 4. Результати СЕ моделювання з визначення сумарних переміщень (а) та еквівалентних деформацій (б)

Представлені на рис. 4 характеристики НДС не враховують внутрішньої концентрації деформацій та напружень в композиті, для оцінки якої було проведено ще один рівень субмоделювання з явним врахуванням кордних волокон в шарі композиту. Результати даного дослідження наведені на рис. 5. При цьому визначено, що в гумовій матриці рівень еквівалентних деформацій внаслідок внутрішньої локалізації біля елементів корду складає 30%, що в 2 рази більше ніж максимальна деформація, яка була встановлена в цій конструкції при попередньому дослідженні. Деформація волокон не перевищує 14%. Характер розподілу напружень є схожим з розподілом деформацій: максимальні еквівалентні напруження в гумовій матриці досягають 11 МПа, а в кордних волокнах – 175 МПа.

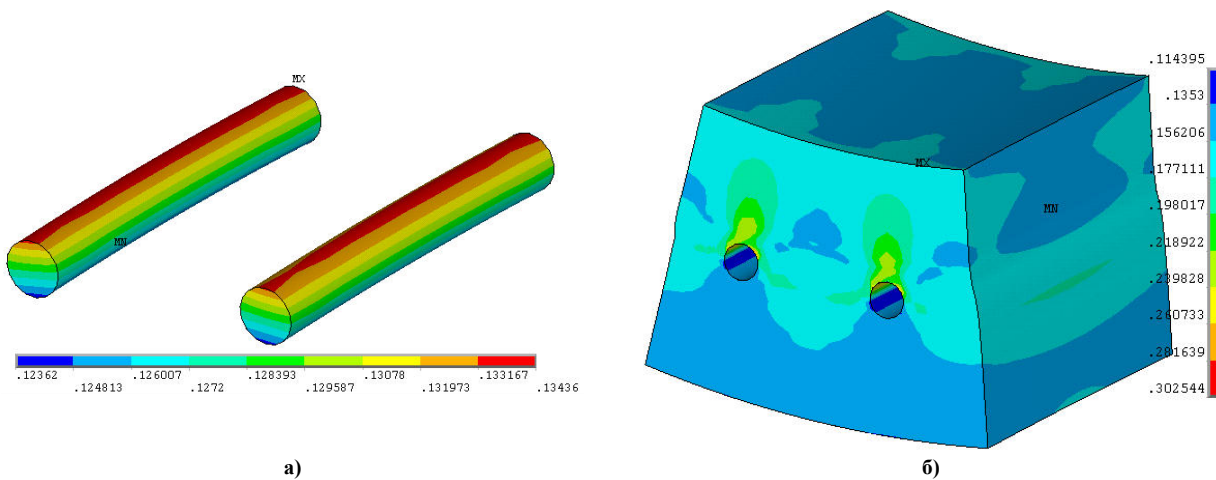


Рис. 5. Результати СЕ субмоделювання з визначення деформацій корду (а) та гумової матриці (б) композитного шару

Аналізуючи можливі значення напружень та деформацій в компенсаторній муфті, слід наголосити, що реальні умови експлуатації не відбуваються з фіксованим рівнем навантаження, а завжди існує певний їх розкид. Таким чином, в даній роботі пропонується вважати, що НДС має середній рівень, що відповідає отриманим з розрахунків значенням, але навколо нього існує випадкова пульсація з амплітудою, що має 30% варіацію. Частота коливань є сталою і складає 4 Гц.

Тобто, вважаємо, що напруження в муфті є стаціонарним вузькополосним випадковим процесом, який задовольняє розподілу Гауса. Такий процес матиме фіксований детермінований рівень середніх напружень σ_m , та випадкову амплітуду $\sigma_a(t)$, яка змінюється відповідно до закону Релея та має експоненційну кореляційну функцію.

Розробка ймовірнісної моделі кінетики росту втомної пошкоджуваності

В даній роботі використовується підхід континуальної механіки пошкоджуваності [8]. Тобто вважається, що циклічні навантаження призводять до накопичення параметру пошкоджуваності (D), який вводиться в рамках концепції Работнова-Качанова. Розглядається нормований параметр, який обмежений інтервалом: $0 \leq D \leq 1$. Параметр пошкоджуваності вважається ізотропним та залежить від часу t амплітуд напружень σ_a і параметрів матеріалу, кінетичне рівняння росту параметру пошкоджуваності припускається в

традиційній степеневій формі. При цьому коефіцієнти рівняння визначаються, відповідно до процедури, яка описана в роботі [8] з параметрів кривої Велера.

З огляду на те, що типовий термін експлуатації можна порівняти з часом старіння, під час якого характеристики опору втомі значно змінюється, і той факт, що процеси деградації поступово, але постійно змінюють опір втомі під час фактичної експлуатації, існує проблема врахування даного процесу в кінетичному рівнянні для параметру пошкоджуваності. З даних по експериментальним випробуванням відомо, що характеристики втомної міцності мають істотний випадковий розкид своїх значень, особливо щодо числа циклів до відмови. У даній роботі було враховано цю особливість та пропонується розглянути накопичення втомних пошкоджень в ймовірнісній постановці. Отже, диференційне рівняння, що описує процес накопичення пошкоджуваності в даній роботі представлено в наступному виді

$$\frac{dD}{dt} = \frac{\omega_e}{N_0(t) \cdot (m+1) \cdot \sigma_e^m} \left(\frac{\sigma_a(t)}{1-D} \right)^m \tag{1}$$

де m – параметр, що характеризує нахил кривої Велера, σ_e – межа витривалості, $N_0(t)$ – число циклів до руйнування при амплітуді, що відповідає межі витривалості σ_e , яке є випадковою спадаючою функцією часу, що описує процес старіння. Для опису закономірностей зміни характеристик втомної міцності в літературі найчастіше пропонується використовувати гіперболічну залежність [6]:

$$N_0 = \frac{N_{00}}{(1 + \gamma \cdot t)}, \tag{2}$$

де N_{00} , γ – незалежні випадкові параметри, які представляють собою початкове значення числа циклів до відмови та швидкість його зміни.

Модель, описана в даній роботі буде використовуватися для вивчення втомі гумо-кордної муфти-труби. Відповідна модель дозволяє врахувати існування випадкової стаціонарної вузькосмугової варіації напружень з відомими параметрами, а також процесу деградації характеристик опору втомі внаслідок старіння матеріалу. У статті вважається, що процеси старіння та зміни напружень статистично некорельовані випадкові функції часу. Таким чином, процес старіння не впливає на амплітуди напружень безпосередньо і навпаки.

Представлено кінетичне рівняння (1) описує процес накопичення втомі в слабкій точці конструкції. В наслідок наявності випадкових складових параметр пошкоджуваності також буде випадковим процесом. Проблема пошуку ймовірнісних характеристик параметру пошкоджуваності ускладнюється через нелінійність диференційного рівняння (1). Вирішення цієї проблеми можна знайти шляхом введення заміни. Відповідний підхід розглянуто в роботах [8], де було показано, що щільність ймовірності пошкоджуваності можна визначити наступним чином:

$$f_D(D,t) = \frac{(m+1)(1-D)^m}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_z(t)} \exp \left[- \frac{(1 - \langle z(t) \rangle - (1-D)^{m+1})^2}{\sigma_z^2(t)} \right], \tag{3}$$

де $\langle z(t) \rangle$ та $\sigma_z(t)$ – математичне очікування та с.к.в. спеціально введеної функції z , які можуть бути розраховані аналітично:

$$\langle z(t) \rangle = \psi \left\langle \xi^m \right\rangle \left\langle \chi^{-1} \right\rangle \left(t + \frac{\langle \gamma \rangle t^2}{2} \right), \quad \psi = \frac{(\langle \sigma_a \rangle)^m \omega_e}{\sigma_e^m \langle N_0 \rangle} \tag{4}$$

$$\sigma_z^2 = \beta_4 t^4 + \beta_3 t^3 + \beta_2 t^2 + \beta_1 t - \langle z(t) \rangle^2, \tag{5}$$

де коефіцієнти β_i є сталими параметрами, що визначаються з наступних співвідношень:

$$\beta_1 = \psi^2 \left\langle \chi^{-2} \right\rangle \frac{2k_3^2}{\alpha} \left(1 - \frac{\langle \gamma \rangle}{\alpha} \right), \quad \beta_2 = \psi^2 \left\langle \chi^{-2} \right\rangle \left(k_0^2 + \frac{2k_3^2}{\alpha} \langle \gamma \rangle - \frac{k_3^2}{\alpha^2} \langle \gamma^2 \rangle \right), \tag{6}$$

$$\beta_3 = \psi^2 \left\langle \chi^{-2} \right\rangle \langle \gamma \rangle k_0^2, \quad \beta_4 = \psi^2 \left\langle \chi^{-2} \right\rangle \langle \gamma^2 \rangle \frac{k_0^2}{4}, \tag{7}$$

$$\left\langle \xi^m \right\rangle = k_0 = \int_0^\infty \xi^m \cdot f_\xi(\xi) d\xi = \int_0^\infty \frac{\xi^{m+1}}{\sigma_\xi^2} \exp \left(- \frac{\xi^2}{2\sigma_\xi^2} \right) d\xi = \sigma_\xi^m 2^{\frac{m}{2}} \Gamma \left(\frac{m}{2} + 1 \right) \tag{8}$$

$$k_3 = \int_0^\infty \xi_1^m \cdot f_\xi(\xi_1) \left(1 - \frac{\xi_1^2}{2\sigma_\xi^2} \right) d\xi_1 = \sigma_\xi^m 2^{\frac{m}{2}} \left[\Gamma \left(\frac{m}{2} + 1 \right) - \Gamma \left(\frac{m}{2} + 2 \right) \right] \tag{9}$$

де $\Gamma(x)$ – це гамма функція.

У формулах (4), (6) та (7) присутні множники $\langle \chi^{-1} \rangle$ та $\langle \chi^2 \rangle$, які слід окремо визначати відповідно до правил усереднення випадкової величин χ , тобто:

$$\langle \chi^{-c} \rangle = \int_0^{\infty} \chi^{-c} \cdot f_{\chi}(\chi) d\chi = \int_0^{\infty} \chi^{-c} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi V_{N0}}} \exp\left[-\frac{(\chi-1)^2}{2 \cdot V_{N0}^2}\right] d\chi, c=1,2 \quad (10)$$

Вираз (3) дає можливість розрахувати процес накопичення пошкоджуваності у середньому $\langle D \rangle$

$$\langle D(t) \rangle = \int_0^{\infty} D \cdot f_D(D, t) dD \quad (11)$$

Аналіз надійності конструкції

Вираз (3) дозволяє не лише аналізувати закономірності накопичення пошкоджуваності втомі з урахуванням деградації матеріалу але й дає можливість розрахувати характеристики надійності муфти в експлуатації. Ключовим моментом цього підходу є визначення ймовірності безвідмовної муфти залежно від часу або для визначення розподілу ймовірності ресурсу [8]

$$P(t) = \Pr[D \in (0,1)] = \int_0^1 f_D(D, t) dD \quad (12)$$

де $P(t)$ – це ймовірність безвідмовної роботи, а $\Pr[]$ – оператор визначення ймовірності.

На рис. 6 представлено результати розрахунків параметрів надійності конструкції. Ймовірності безвідмовної роботи муфти, як функції часу, а також пунктирної кривою середню пошкоджуваність показано на рис. 6, а. В роботі, зокрема, проаналізовано вплив параметру γ , який характеризує швидкість процесу старіння. Параметр варіювався в широкому діапазоні значень від 0 до 32 рік⁻¹. Нульове значення відповідає оцінці втомі без врахування процесу старіння, в той час якщо $\gamma = 32$ рік⁻¹, то це означає, що кількість циклів до відмови на фіксованому рівні деформацій зменшилась на порядок (у 10 разів) за 3 місяця. Існуючи експериментальні дані по гумі, що має близькі до даного матеріалу властивості [6], показали, що $\gamma = 2$ рік⁻¹ (за 4 роки кількість циклів до відмови зменшувалась на порядок). Гарантований ресурс муфти при цьому складає 6,5 років, а середній – майже 10 років. На рис. 6, б показано залежності зміни характеристик ресурсу (гарантованого, середнього та максимально можливого) від параметру γ .

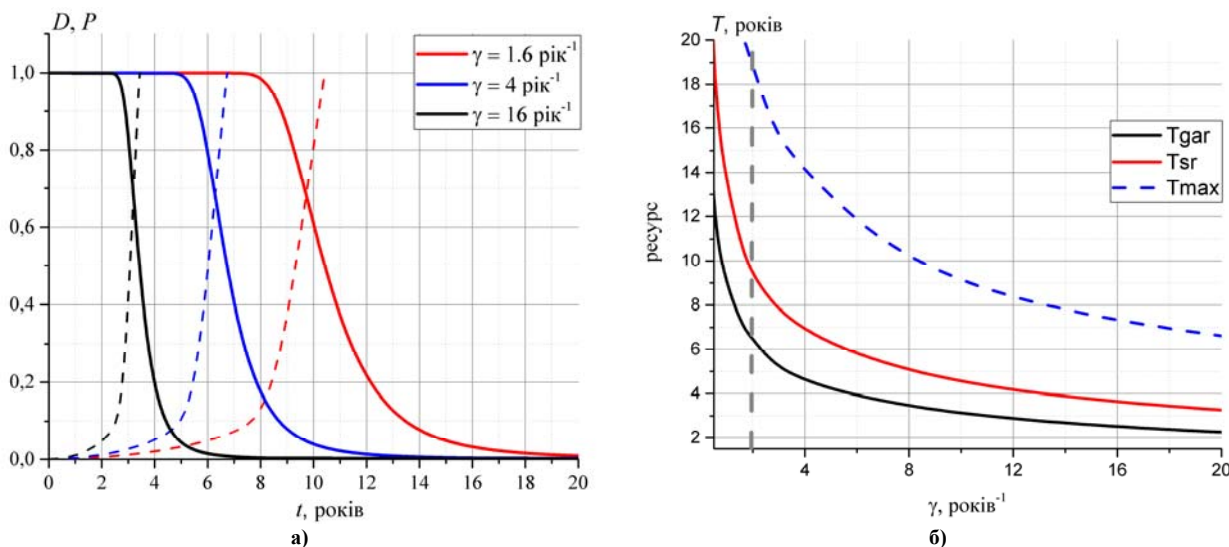


Рис. 6. Ймовірність безвідмовної роботи (а) та ресурс (б) муфти залежно від швидкості старіння матеріалу

Висновки

В роботі розглянуто математичне моделювання надійності багатопарової гумо-кордної компенсаторної муфти трубопроводів. Запропоновано модель оцінки накопичення втомної пошкоджуваності в даній конструкції, яка враховує можливу варіацію напружень в процесі експлуатації, а також процеси зміни характеристик опору втомі в матеріалах внаслідок природного старіння. Характеристики напружено деформованого стану муфти проаналізовані в рамках методу скінчених елементів із застосуванням процедури ітеративного субмоделювання. При цьому встановлено, що навколо кордних елементів рівні деформацій досягають 30% внаслідок внутрішньої концентрації, яка викликана неоднорідністю будови композита. З урахуванням випадкового процесу старіння, а також допускаючи випадкову варіацію напружень навколо визначено в розрахунках значення було проведено оцінку ймовірності безвідмовної роботи та прогноз ресурсу. Проаналізовано вплив параметру швидкості старіння матеріалу на характеристик ресурсу.

Література

1. Fedorko G. Failure analysis of irreversible changes in the construction of the damaged rubber hoses / Gabriel Fedorko, Vierslav Molnar, Miroslav Dovica, Teodor Toth, Jana Fabianova // *Engineering Failure Analysis*. – 2015. – Vol. 58. – P. 31–43.
2. Seung-Bum Kwak. Micro-damage formation of a rubber hose assembly for automotive hydraulic brakes under a durability test / Seung-Bum Kwak, Nak-Sam Choi // *Engineering Failure Analysis*. – 2009. – Vol. 16. – P. 1262–1269.
3. Cho J.R. Fatigue life assessment of fabric braided composite rubber hose in complicated large deformation cyclic motion / J.R. Cho, Y.H. Yoon, C.W. Seo, Y.G. Kim // *Finite Elements in Analysis and Design*. – 2015. – Vol. 100. – P. 65–76.
4. Mars W. A literature survey on fatigue analysis approaches for rubber / W. Mars, A. Fatemi // *International Journal of Fatigue*. – 2002. – Vol. 24, No. 9. – P. 949–961.
5. Трощенко В. Т. Рассеяние характеристик усталости сталей и его анализ с учетом циклических деформаций / В.Т. Трощенко, Ю.И. Коваль, Е.И. Митченко // *Проблемы прочности*. – 2007. – № 3. – С. 5–22.
6. Ларін О. О. Дослідження характеристик опору втомі гумових сумішей, що входять до складу елементів пневматичних шин після штучного старіння матеріалу / О. О. Ларін // *Вісник НТУ "ХПІ": Серія "Нові рішення у сучасних технологіях"*. – 2015. – № 46. – С. 45–50.
7. Синюк О.М. Математична модель анізотропних властивостей полімерних матеріалів / О.М. Синюк // *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. – 2015. – № 1 (221). – С. 12–18.
8. Ларін О. О. Визначення показників надійності напівпричепу автоцистерни в експлуатації методами комп'ютерної механіки / О. О. Ларін, К. Є. Грінченко // *Вісник НТУ "ХПІ": Серія "Нові рішення у сучасних технологіях"*. – 2015. – № 39. – С. 47–55.

Рецензія/Peer review : 13.7.2016 р.

Надрукована/Printed : 25.8.2016 р.

Стаття рецензована редакційною колегією