

О. О. ЛАРИН, канд. техн. наук, доцент, НТУ «ХП»;
Ю. А. ПЕТРОВА, аспірант, НТУ «ХП»

ВИЗНАЧЕННЯ ЦИКЛІВ НАПРУЖЕНЬ ЕЛЕМЕНТІВ ПНЕВМА-ТИЧНОЇ ШИНИ З ВИКОРИСТАННЯМ ПОЦЕДУРИ СУБМОДЕЛЮВАННЯ

В ході даної роботи були створені геометрична та скінчено-елементна моделі пневматичної шини, з урахуванням ортотропії механічних властивостей у гумово-кордних шарах. Таке моделювання було здійснено за допомогою введення локальних фінітно-тороїдальних систем координат. Був проведений розрахунок задачі контактної взаємодії шини з дорожнім покриттям з урахування геометричної і фізичної нелінійності. Для отримання достовірних результатів по напруженням, був використаний підхід двомасштабного субмоделювання.

Ключові слова: композити, субмоделювання, цикли напружень.

Вступ. Пневматична шина є важливим елементом сучасних транспортних засобів (ТЗ), від параметрів якого залежать, наприклад, експлуатаційні та функціональні характеристики ТЗ, а також, безпека руху. Показники жорсткості у радіальному та аксіальному напрямках суттєво впливають на плавність ходу, керованість і стійкість руху [1]. Особливості контактної взаємодії визначають їх гальмівні та динамічні характеристики (спилка). Циклічне деформування, що виникає в шині під час кочення формує процеси теплоутворення [2], які обумовлюють демпфуючі властивості колеса, а отже, впливають на плавність ходу та опір коченню [3,4].

Однією з важливих характеристик якості шин також є термін їх служби, який визначається здатністю шинних матеріалів чинити опір різним видам руйнування.

Традиційні інженерні підходи до визначення основних експлуатаційних показників шин засновані на експериментальних (стендових та дорожніх) випробуваннях та теоретичному моделюванні із застосуванням методу скінчених елементів (МСЕ) [5].

Експериментальні дослідження є коштовними та дають результати лише по інтегральним та усередненим показникам. Задача синтезу внутрішньої будови шини та аналізу впливу конструкційних особливостей на характеристики шин є надзвичайно складною. Навіть за великої кількості експериментів, що зокрема потребують складного обладнання, виготовлення дослідницьких зразків і т.п., ми отримаємо лише усереднені характеристики. Крім того, технічно дуже складно визначити внутрішню локалізацію НДС в шині, тим більше, в процесі експлуатації.

Аналогічно, експериментальні методи складно застосовувати для дослі-

дження процесів внутрішнього теплоутворення та теплопровідності, процесів накопичення втоми, старіння матеріалів тощо [3,6].

Слід також наголосити, що відмічені процеси здатні істотно змінювати характеристики пневматичних шин в процесі експлуатації та з часом [7]. Так, нагрів гумоподібних матеріалів, змінює їх властивості, а отже, і особливості деформування, і жорсткісні характеристики колеса і т.д. Дослідження таких явищ є окремою і самостійною задачею, що є цікавою з теоретичної і практичної точок зору.

Відмічені особливості пояснюють той факт, що у сучасній практиці проектування пневматичних шин все більше застосовується комп'ютерне моделювання [8]. При цьому, зазвичай, розв'язується контактна задача пружного та термопружного деформування на основі МСЕ.

У сучасній науковій практиці експериментальні методи застосовуються для визначення властивостей матеріалів, параметризації моделей і для перевірки адекватності та достовірності побудови моделі.

Основні характеристики шин визначаються особливостями деформування, що виникає під час роботи, характером контакту шини з дорогою, значеннями напружено-деформованого стану (НДС) і характером розподілу напружень у зоні контакту.

Чисельні розрахунки даної задачі ускладнюються низкою особливостей, а саме, наявністю шарів з ортотропними властивостями матеріалу, геометричної нелінійності, нелінійності фізичних співвідношень для гумових матеріалів, контактної взаємодії. Врахування всіх цих особливостей, призводить до суттєвої нелінійності математичної моделі. А при збільшенні розмірності нелінійної системи виникає проблема досягнення збіжності чисельних процедур, що застосовуються для пошуку розв'язку.

Так, при тривимірному моделюванні шини найбільш грубою є СЕ сітка, параметри якої задовольняють вимогам, що висуваються до СЕ: ширини сторін 1:5, кути $> 20^\circ$.

Практика розрахунків задачі статичного деформування пневматичної шини із твердою основою з урахуванням ортотропії властивостей, нелінійності в поведінці матеріалів, великих прогинів показує, що суттєві проблеми із збіжністю розв'язків виникають для систем, що мають 10^5 рівнянь при розв'язанні методом Ньютона-Рафсона.

Разом з тим достовірно визначення параметрів НДС потребує побудови докладної моделі з високою густиною сітки СЕ в областях, в яких очікуються великі значення деформацій. Тобто використання систем, розмірність яких більша за 10^5 .

Проте нехтування нелінійними ефектами неприпустимо. Так, досвід попередніх результатів вивчення даного об'єкту показує, що, наприклад, неврахування геометричної нелінійності дає похибку обчислень близько 30%, навіть у визначенні статичного прогину [9].

Для вирішення вищезазначених 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 деформування.

На другому етапі, з повної розрахункової моделі вилучається певна її частина, для якої відбувається перестроювання сітки, що дозволяє виконати більш докладний аналіз для виділеної області. Це дозволяє отримати більш точну інформацію для частини конструкції, не збільшуючи розмірності задачі.

Метою роботи є комп'ютерне моделювання циклічного НДС пневматичної шини, що виникає внаслідок контактної взаємодії з дорожнім покриттям, на основі тривимірних СЕ моделей, що враховують багатшарову структуру, ортотропію механічних властивостей, геометричні та фізичні нелінійності. Для досягнення цієї мети запропоновано застосувати багатомасштабний підхід, що дозволяє підвищити ефективність чисельного моделювання.

1. Об'єкт, що досліджується. На всіх етапах моделювання враховувались основні особливості конструкції, характеристики матеріалів та їх неоднорідність тощо. Зокрема враховувалось, що конструкція пневматичної шини складається з різних за властивостями і функціональному призначенню шарів (рис. 1).

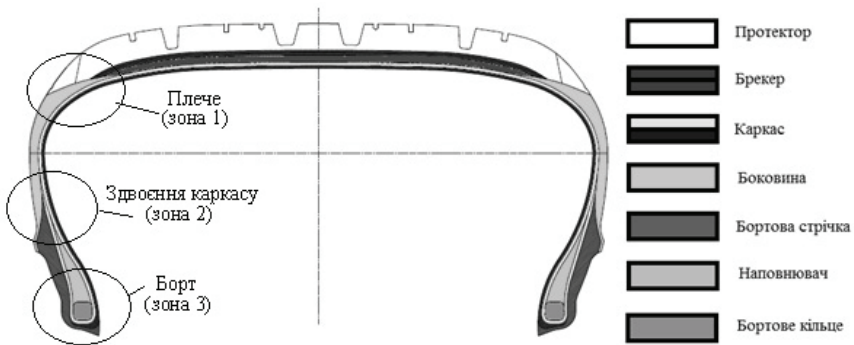


Рисунок 1 – Структурна карта пневматичної шини

Показники механічних характеристик окремих шинних матеріалів помітно відрізняються один від одного (див. табл. 1) і тому в даній роботі всі вони явним чином враховувались в СЕ моделях всіх рівнів розгляду.

В ході попередніх досліджень було виявлено наявність великих прогинів та помірних деформацій (~100 %). Тому явно просліджується необхідність врахування геометричної нелінійності для розрахунків даного об'єкту. Крім того спостерігається гіперпружна поведінка гумових матеріалів. Для враху-

вання цієї фізичної нелінійності в даній роботі була використана модель Нео-Гука, яка досить точно апроксимує поведінку гумових матеріалів за великих прогинів, але помірних деформацій.

Таблиця 1 – Властивості матеріалів гумових шарів

	Модуль пружності	Коефіцієнт Пуассона	Щільність
	E , МПа	ν	ρ , кг/м ³
Протектор	3,00	0,49	1200
Боковина	3,74	0,49	1200
Бортова стрічка	7,00	0,49	1200
Наповнювач	16,00	0,49	1200

Таким чином, гумовим шарам (протектор, боковина, бортова стрічка, наповнювач) властивості задавались відповідно моделі Нео-Гука.

Перерахунок технічних констант в константи моделі Нео-Гука (η , d) здійснюється за формулами:

$$\eta = \frac{E}{2(1+\nu)}; \quad d = \frac{2E}{3(1-2\nu)}. \quad (1)$$

Значну особливість даної конструкції також становить наявність композитних гумово-кордних шарів, які представляють собою гумову матрицю з текстильним (каркас) та металевим (брекер) кордом. Жорсткість корду брекера 1333 Н/нитку, з частотою укладання волокон 600 ниток/м. У випадку текстильної нитки жорсткість складає 294 Н/нитку з частотою укладання 1130 ниток/м. Діаметр волокон у шарах каркасу і брекера 0,63 мм і 0,64 мм відповідно.

У табл. 2 наведені механічні властивості складових композитних шарів.

Таблиця 2 – Властивості матеріалів кордних шарів (технічні константи)

	Корд		Гумова матриця	
	Модуль пружності, МПа	Коефіцієнт Пуассона	Модуль пружності, МПа	Коефіцієнт Пуассона
	E	ν	E	ν
Каркас	77120	0,3	6	0,49
Брекер	74730	0,3		

Таким чином, шари каркасу і брекера – завдяки корду мають достатньо велику жорсткість. Для їх моделювання достатньо використати закон Гука, але з яскраво вираженими трьома основними напрямками властивостей. Відповідно, модель матеріалу, використана для їх моделювання – ортотропна. В даному випадку використовувались усереднені характеристики матеріалу. Механічні властивості цих шарів наведені в табл. 3. Використані дані наведені в [10].

Важливою частиною моделювання даної конструкції є проблема урахування криволінійної ортотропії механічних властивостей в гумово-кордних

шарах. Дійсно, орієнтація волокон корда композитних шарів в одному напрямку повторює поперечний переріз шини, а в іншому співпадає з окружним напрямом колеса або під кутом до нього. Для вирішення цієї проблеми було введено локальні фінітно-тороїдальні системи координат, в яких напрямки осей повторюють геометрію відповідних шарів (рис. 2).

Таблиця 3 – Властивості гумово-кордних шарів шини

	Модуль пружності, МПа			Коефіцієнт Пуассона			Модуль зсуву, МПа		
	E_x	E_y	E_z	ν_{xy}	ν_{yz}	ν_{xz}	G_{xy}	G_{yz}	G_{xz}
Каркас	11,8	11,8	4380	0,44	0,0012	0,0012	9,9	9,9	3,3
Брекер	11,4	5430	439,7	0,008	0,17	0,086	921,7	9,57	9,57

Побудова шарів каркаса і брекера відбувається шляхом протягування з обертанням відповідних частин профілю шини. При цьому елементи профіля, що відповідають каркасу розбиваються на кілька поверхонь, таким чином, аби контур кожної з них являв собою дугу кола, радіус якої і буде параметром даної локальної системи.

На рис.2 представлено положення локальних систем координат і розбиття на поверхні, в межах яких діє кожна з них.

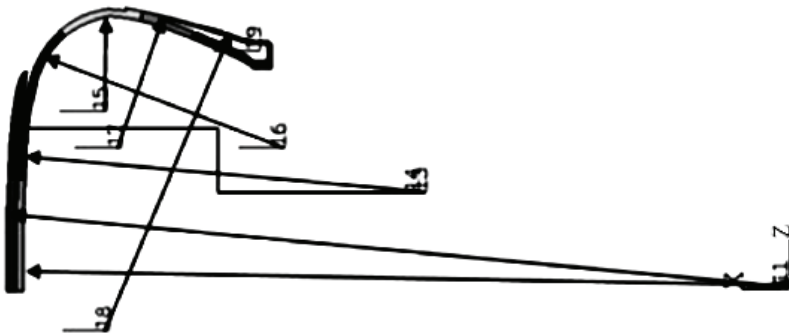


Рисунок 2 – Розташування локальних фінітно-тороїдальних систем координат

2. Скінченно-елементне моделювання. Відповідно до запропонованої методики в даній роботі СЕ моделювання здійснюється у кілька етапів. На кожному етапі певна частина шини розглядається у більш докладному масштабі, використовуючи підхід субмоделювання. Спочатку створюється СЕ модель з такою сіткою, яка цілком достатня для адекватного опису основних особливостей силової дії і виділення зон великих деформацій, але є недостатньо дрібною, щоб отримати достовірні результати по характеристикам НДС. Потім встановлюється, яка область моделі вимагає уточненого аналізу з використанням підмоделі. В даному випадку, потрібно отримати більше подро-

биць в зоні високих деформацій (зона контакту шини з дорожнім покриттям).

Таким чином, на першому етапі створюється повна модель шини, з урахуванням основних конструктивних особливостей, геометричної та фізичної нелінійностей. Розмірність цієї SE-сітки є максимально можливою, за якої досягається збіжність чисельного розв'язку.

При побудові об'ємної SE моделі використовується восьмивузловий твердотільний скінчений елемент із трьома ступенями свободи в вузлі.

Об'ємна SE модель будується шляхом екструдування поверхонь.

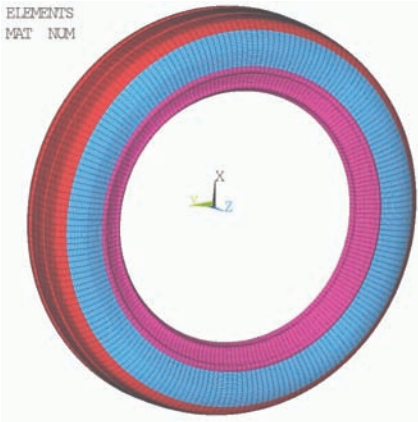


Рисунок 3 – Об'ємна SE модель

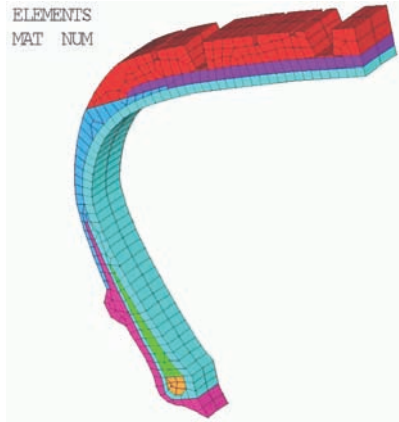


Рисунок 4 – Сегмент SE моделі

В якості кінематичних граничних умов виступає обмеження переміщень по всіх напрямках частини зовнішньої поверхні бортової стрічки, що імітує взаємодію з диском. Деформування шини аналізувалось в рамках її контактної взаємодії із дорожнім покриттям. До силових граничних умов відноситься тиск розміром 0.2 МПа, прикладений до внутрішньої поверхні каркаса та навантаження, що імітує відповідну частину ваги автомобіля, прикладається до дорожнього покриття. Враховуються наявність площини симетрії.

Результатами розгляду на цьому етапі є загальна картина деформування шини в контакті з дорогою (рис. 5). Це дає можливість визначити місця з найбільшим градієнтом деформацій для подальшого детального їх розгляду.

На другому етапі в якості субмоделі був виділений сегмент у 45 градусів з повної моделі шини, яка була розрахована на попередньому етапі. Для цієї моделі створена нова значно подрібнена сітка (кількість SE елементів сегменту дорівнює кількості SE елементів всієї шини).

В якості граничних умов субмоделі використані ті ж граничні умови, що й в повній моделі та додатково на границях сектору (рис.6) прикладені переміщення, отримані в цих вузлах при розрахунку повної моделі для імітації дії відкинutoї частини.

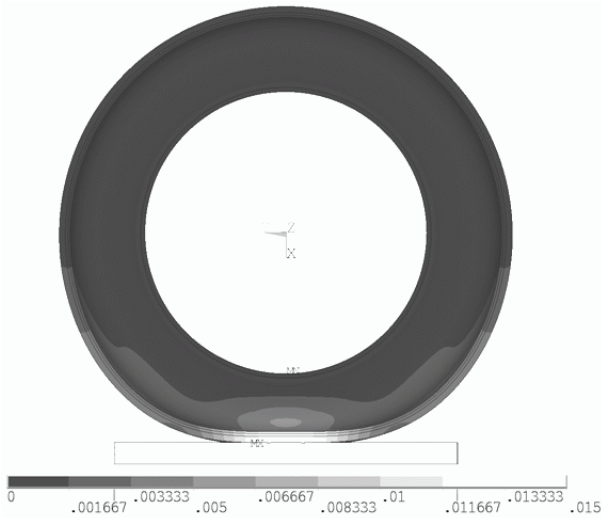


Рисунок 5 – Деформована форма повної моделі

На третьому етапі субмоделювання з 45-градусного сегменту виділяються дві ще менші – 15-градусні сегменти за аналогічною процедурою. Відповідно розмірність SE сітки кожного з 15-градусних сегментів дорівнює розмірності 45-градусного. Конкретизація проведення другого етапу субмоделювання наведена на рис.6, де також проілюстровані граничні умови, які імпортувались в якості переміщень, отриманих при розрахунку 45-градусного сегменту, у відповідних зонах.

Визначення напружень у найбільш деформованих зонах

Аналіз отриманих даних по НДС елементів шини дозволяє визначити, що найбільш навантаженими є каркас та брекер, у яких можна виділити чотири зони найбільших деформацій (3 у шарі каркасу та 1 у шарі брекера, див рис. 7). Ці зони відповідають наступним областям: плечовій (каркас та брекер), бортовій (каркас) та місцю здвоєння каркасу. Бортова зона має найбільші деформації на секторі (0-15)°. А решта областей відповідно на секторі (30-45)°.

Результати достовірного визначення напружень отримані в ході вищезазначених розрахунків потребують додаткового уточнення. Оскільки, з отриманих результатів неможливо виділити складові напружень, які виникають у корді та гумовій матриці.

Відповідне довизначення напружень виконується шляхом перерахунку отриманих деформацій окремо для матеріалів гумової матриці та кордів згідно до узагальненого закону Гука (2). Технічні константи для кордної та гумової частини композитних шарів наведено в табл. 3.

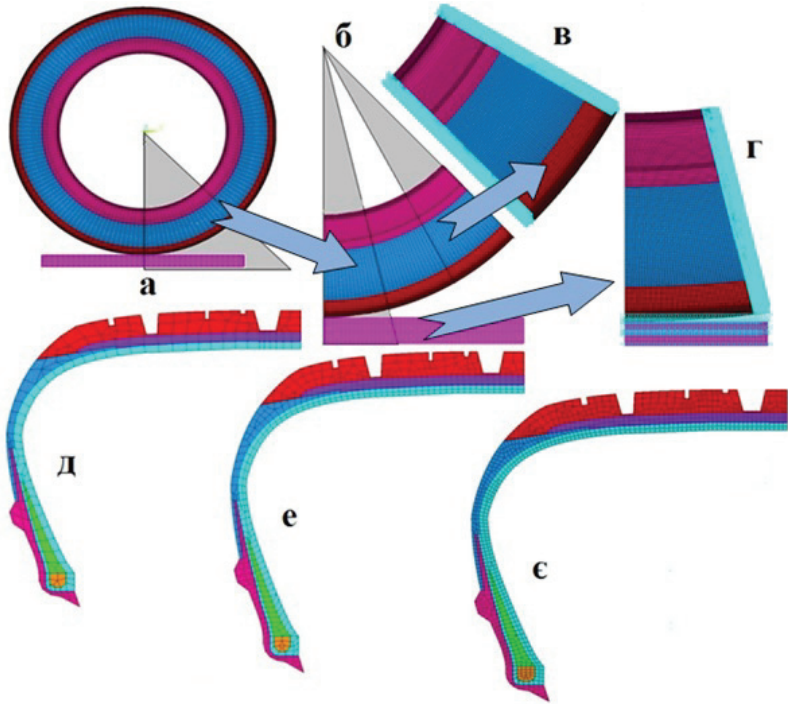


Рисунок 6 – Схема субмоделювання: а – повна SE-модель шини з дорогою, б – 45-градусний сегмент, в – 15-градусний сегмент (боковий), г – 15-градусний сегмент(центральный), д, е, є – порівняння SE сіток

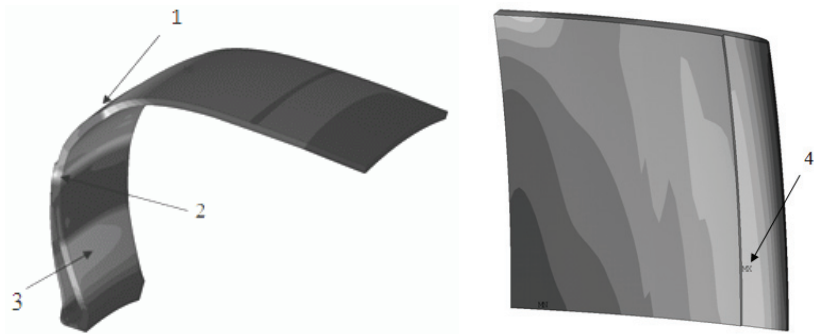


Рисунок 7 – Зони найбільших деформацій каркасу та брекера: 1 – плечова зона каркасу; 2 – здвоєння каркасу; 3 – бортова зона каркасу, 4 – брекер

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2\mu + \lambda & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & 2\mu + \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & 2\mu + \lambda & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{13} \\ 2\varepsilon_{12} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

де σ_{ij} – компоненти тензора напружень, ε_{ij} – компоненти тензора деформацій, λ , μ – константи Ляме, які задаються окремо для матеріалів гумової матриці та кордів.

Розподіл напружень в елементах шини внаслідок лінійності перерахунків якісно співпадає з розподілом деформацій, які наведені на рис. 7. Для кількісного аналізу в даній роботі пропонується побудувати цикли зміни максимальних напружень, що матимуть місце при оберті колеса.

Отримані цикли зміни напруженого стану найбільш деформованих зон композитних шарів є необхідними для подальшого аналізу втомі, і, як результат, прогнозування ресурсу шини, а також, для оцінки процесів теплоутворення.

Процедура побудови циклів передбачала апроксимацію напружень по значеннях, що були визначені на 15 – градусних сегментах, а також, в зоні віддаленої від контакту.

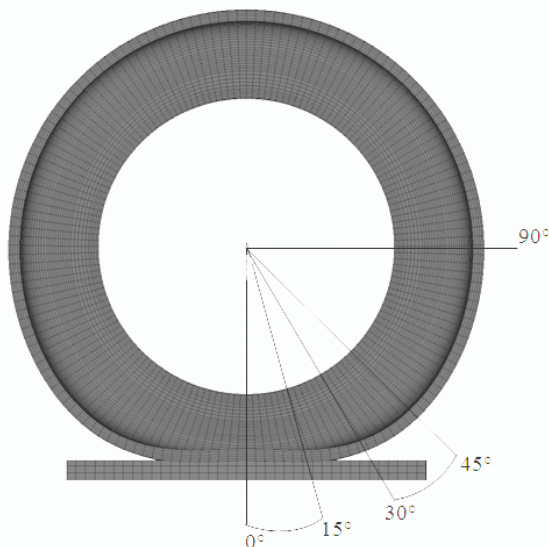


Рисунок 8 – Зони, в яких визначаються значення деформацій

В композитних шарах 15-градусних сегментів (центрального і бокового) обираємо найбільш деформовані зони. Отримуємо значення деформацій в вузлах цих зон, що знаходяться вздовж ліній, де дві координати зафіксовано, а змінюється лише окружна координата. Користуючись формулою (2) визначаємо значення напружень. Нижче наведені зони, для яких були визначені значення напружень у відповідних шарах (рис. 8).

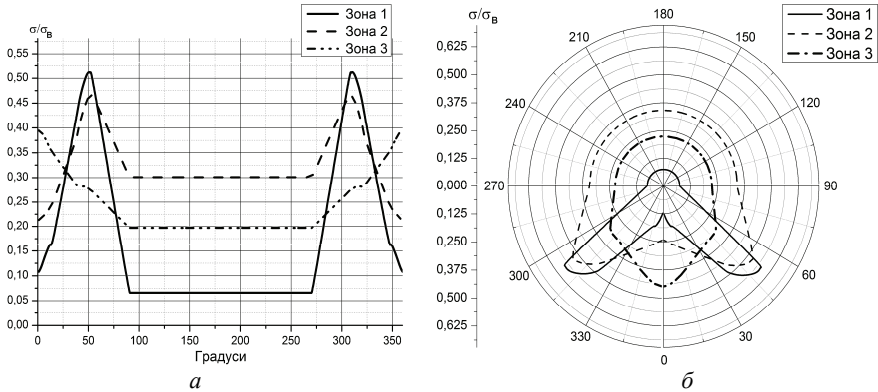


Рисунок 9 – Цикл напруженого стану корду каркасу:
 a – у декартовій системі координат, b – у полярній системі координат

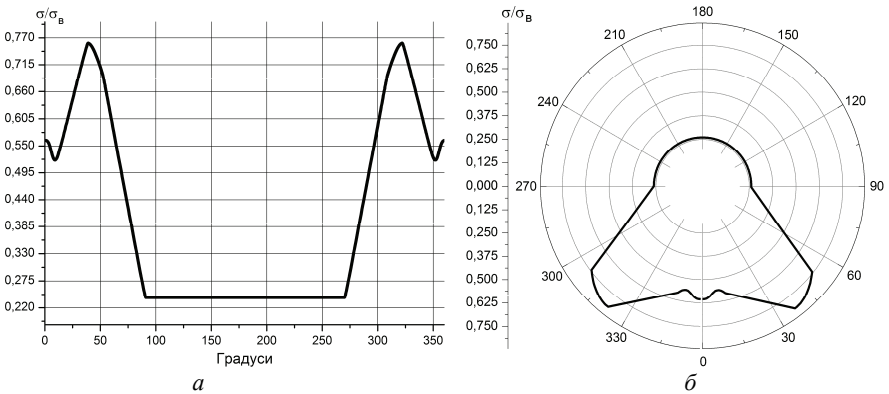


Рисунок 10 – Цикл напруженого стану корду брекєру
 a – у декартовій системі координат, b – у полярній системі координат

На рис. 9 відображені цикли напруженого стану корду у всіх контрольних зонах каркасу. Аналіз цього графіку показує, що найбільші напруження зафіксовані вздовж ліній з окружною координатою 50 і 307 градусів, що відповідають зміні області контакту на безконтактну. Слід відзначити, що шкала напружень у відносних одиницях. Поточні напруження віднесені до границі

міцності. Для полегшення аналізу продемонстровані цикли напруженого стану у полярних координатах рис.9, б – рис. 12, б (0° відповідає області контакту шини з дорожнім покриттям).

На рис. 10 зображено цикл напруженого стану корду брекера. Максимальні напруження зафіксовано вздовж ліній з окружною координатою 42 і 324 градуси, що також відповідають зміні області контакту на безконтактну (але ближче до контактної, ніж у попередньому випадку).

Цикл напружень гумової матриці брекера наведений у вигляді рис. 12. Свої максимуми він має у місцях відповідних до тих, що спостерігались у корді.

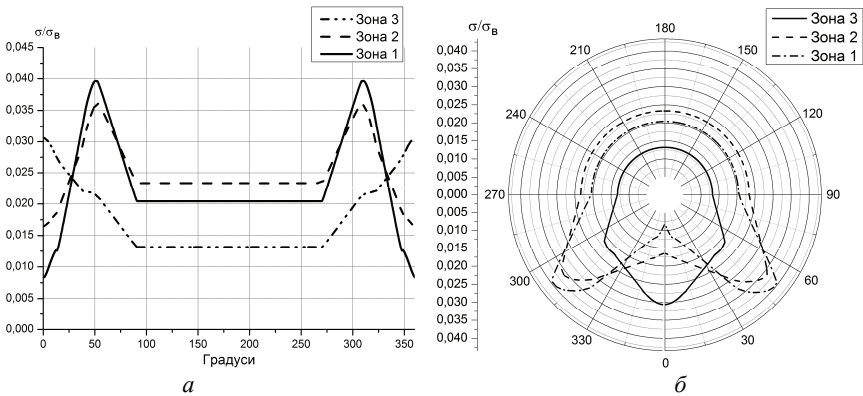


Рисунок 11 – Цикл напруженого стану гумової матриці каркасу:
 a – у декартовій системі координат, b – у полярній системі координат

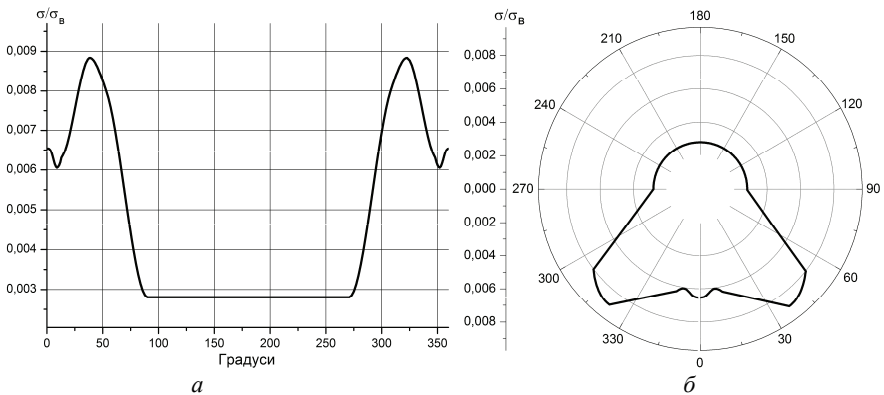


Рисунок 12 – Цикл напруженого стану гумової матриці брекера:
 a – у декартовій системі координат, b – у полярній системі координат

Узагальнення наведених результатів показує, що найбільш навантаже-

ною областю є плечова зона. Також слід відмітити, що дана зона має два сплески напружень за один оберт колеса. Така ж ситуація спостерігається і в зоні 2. А в бортовій зоні, на відміну від інших, має місце лише один сплеск напружень за один оберт.

Висновки. В ході даної роботи були створені геометрична та скінчено-елементна моделі пневматичної шини, з урахуванням ортотропії механічних властивостей у гумово-кордних шарах (каркас і брекер). Таке моделювання було здійснено за допомогою введення локальних фінітно-тороїдальних систем координат. Були проведені розрахунки з урахування геометричної і фізичної нелінійності, отримані результати НДС шини під дією внутрішнього тиску (0.2 МПа). Проведений розрахунок контактної задачі.

Для отримання достовірних результатів по напруженням, був використаний підхід двомасштабного моделювання. У якості результатів отримані картини розподілу напружень та деформацій. Виявлені найбільш деформовані зони гумово-кордних шарів. Побудовано графіки циклів напруженого стану рухомої шини в контрольних зонах окремо для кордної і гумової складової.

Список літератури: 1. *Yong-Woo K.* Micromechanically consistent calculation of rotational stiffness of radial tire / *Yong-Woo K.* // Journal of Mechanical Science and Technology 23. – 2009. – P. 1294-1305. 2. *Sokolov S. L.* Analysis of the heat state of pneumatic tires by the finite element method / *S. L. Sokolov* // Journal of machinery manufacture and reliability. – 2009. – Vol. 38, № 3. – P. 310-314. 3. *Cho J.R.* Numerical estimation of rolling resistance and temperature distribution of 3-D periodic patterned tire / *J.R. Cho, H.W. Lee, W.B. Jeong, K.M. Jeong, K.W. Kim* // International journal of solids and structures 50. – 2013. – P. 86-96. 4. *Gai-ling M.A.* Computation of rolling resistance caused by rubber hysteresis of truck radial tire / *M. A. Gai-ling, X.U. Hong, C.U.I. Wen-yong* // J Zhejiang University Science A. – 2007. – P. 778-785. 5. *Sokolov S. L.* Calculation of the stress-strain state of pneumatic tires by the finite element method / *S. L. Sokolov* // Journal of machinery manufacture and reliability. – 2007. – P. 45-49. 6. *Zuo S. G.* Prediction procedure for wear distribution of transient rolling tire/ *S. G. Zuo, T. X. Ni, X. D. Wu, K. Wu, X. W. Yang* // International Journal of Automotive Technology. – 2014. – P. 505-515. 7. *Rao Shiguo* Mechanical properties and failure behavior of cord/rubber composites / *Shiguo Rao Isaac M. Daniel, Emmanuel E. Gdoutos* // Applied Composite Materials. – 2004. – 11. – P. 353-375. 8. *Sheshenin S. V.* Three-Dimensional Modeling of Tires / *S. V. Sheshenin* // Mechanics of Solids. – 2007. – Vol. 42, № 3. – P. 338-345. 9. *Кондрикова А.А.* Моделювання контактної взаємодії пневматичних шин з дорогою з урахуванням геометричної та фізичної нелінійності їх деформування / *А.А. Кондрикова, О.О. Ларін* // Вісник НТУ «ХПІ». Серія «Динаміка та міцність машин». – 2011. – № 52. – С. 94-101. 10. *Larin O.* Two-scale approach to modelling of pneumatic tyres / *O. Larin, Yu. Petrova, V. Mateichyk* // Systems and means of motor transport. Selected problems. – Monographia № 4. Seria: Transport. – Rzeszow: Politechnika Pzeszowska Im. Ignacego Lukaszewicza, 2013. – P. 123-128.

Bibliography (transliterated): 1. *Yong-Woo K.* Micromechanically consistent calculation of rotational stiffness of radial tire. *Yong-Woo K.* Journal of Mechanical Science and Technology 23. 2009. P. 1294-1305 Print. 2. *Sokolov S. L.* Analysis of the heat state of pneumatic tires by the finite element method. *S. L. Sokolov* Journal of machinery manufacture and reliability. 2009. Vol. 38, № 3. 310-314 Print. 3. *Cho J.R.* Numerical estimation of rolling resistance and temperature distribution of 3-D periodic patterned tire. *J.R. Cho, H.W. Lee, W.B. Jeong, K.M. Jeong, K.W. Kim.* International journal of solids and structures 50. 2013. 86-96 Print. 4. *Gai-ling M.A.* Computation of rolling resistance caused by rubber hysteresis of truck radial tire. *M. A. Gai-ling, X.U. Hong, C.U.I. Wen-yong.* J Zhejiang University

Science A. 2007. 778-785 Print. **5.** Sokolov S. L. Calculation of the stress-strain state of pneumatic tires by the finite element method. S. L. Sokolov. Journal of machinery manufacture and reliability. 2007. 45-49 Print. **6.** Zuo S. G. Prediction procedure for wear distribution of transient rolling tire. S. G. Zuo, T. X. Ni, X. D. Wu, K. Wu, X. W. Yang. International Journal of Automotive Technology. 2014. 505-515 Print. **7.** Rao Shiguo Mechanical properties and failure behavior of cord/rubber composites. Shiguo Rao Isaac M. Daniel, Emmanuel E. Gdoutos. Applied Composite Materials. 2004. 11. 353-375 Print. **8.** Sheshenin S. V. Three-Dimensional Modeling of Tires. S. V. Sheshenin. Mechanics of Solids. 2007. Vol. 42, № 3. 338-345 Print. **9.** Kondrykova A.A. Modelyuvannya kontaktnoyi vzayemodiyi pnevmatychnykh shyn z dorohoyu z urakhuvannyam heometrychnoyi ta fizychnoyi nelineynosti yikh deformuvannya. A.A. Kondrykova, O.O. Larin. Visnyk NTU «KhPY». Seriya «Dynamika ta micnist' mashyn». 2011. № 52. 94-101 Print. **10.** Larin O. Two-scale approach to modelling of pneumatic tyres. O. Larin, Yu. Petrova, V. Mateichyk. Systems and means of motor transport. Selected problems. Monographia № 4. Seria: Transport. Rzeszow: Politechnika Pzeszowska Im. Ignacego Lukasiewiczza, 2013. 123-128 Print.

Поступила (received) 16.04.2014

УДК 621.643.8

Г.І. ЛЬВОВ, д-р техн. наук, професор, НТУ «ХП»;
В.Г. МАРТИНЕНКО, студент НТУ «ХП»

АНАЛІТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ КОНТАКТНОЇ ПОВЕДІНКИ ДІЛЯНКИ ТРУБОПРОВОДУ З В'ЯЗКОПРУЖНОЮ РЕМОНТНОЮ НАКЛАДКОЮ

У статті описано аналітичні дослідження напружено-деформованого стану ділянки трубопроводу з в'язкопружною ремонтною накладкою в плоскій постановці. Побудована крайова задача для інтегро-диференціальних рівнянь та запропоновано метод її вирішення. Результати розрахунків представлено у вигляді графіків розподілу переміщень та напружень за радіусом та у часі. Зроблено висновок щодо впливу в'язкопружності на загальну оцінку міцності конструкції.

Ключові слова: трубопровід, бандаж, в'язкопружність, інтегральне рівняння

Вступ. В процесі експлуатації газових трубопроводів, що є одними з найважливіших складових енергетичної інфраструктури будь-якої економічно розвинутої країни, стикаються з рядом проблем, серед яких однією з найгостріших є виникнення локальних дефектів трубопроводу, що з'являються внаслідок корозії металу, з якого він виготовлений, а також внаслідок дії сторонніх чинників. В цьому випадку ситуація руйнування особливо критична, оскільки ми маємо справу з легкозаймистою і вибухонебезпечною речовиною. Для ремонту такої конструкції використовують бандажування компози-

© Г.І. Львов, В.Г. Мартиненко, 2014