

УДК 629.11.012.55

**А.А. Ларин,
В.П. Матейчик,
Ю.А. Петрова**

*Національний транспортний університет
вул. Суворова, 1, м. Київ, Україна, 01103*

ПРИМЕНЕНИЕ ДВУХМАСШТАБНОГО ПОДХОДА К МОДЕЛИРОВАНИЮ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ШИН

В статье приведены результаты расчетных исследований по определению усредненных свойств композиционных слоев пневматической шины на основе микромеханического моделирования и результаты применения полученных данных для моделирования работы шины модели 205/55R16.

Ключевые слова: пневматическая шина, микромеханика композитов, ортотропия.

Постановка проблемы. Пневматические шины являются важным элементом ходовой части транспортных средств и во многом определяют основные технические характеристики последних (например, устойчивость, управляемость, экономичность и др.), вместе с тем их надежность является важной составляющей безопасности эксплуатации транспортного средства. Достоверный прогноз ресурса позволяет предотвратить их внезапный выход из строя и, таким образом, повысить безопасность движения транспорта, а также улучшить его экономические показатели. Среди основных типов отказов пневматических шин следует выделить отказы постепенного характера, которые вызваны усталостью и износом [1,3]. Соответствующие отказы возникают в результате развития необратимых кинетических процессов накопления повреждаемости материала внутри шины. Соответствующие повреждения являются скрытыми, а при достижении критических размеров способны внезапно проявиться выходом из строя всей конструкции.

Отказы такого типа формируются под влиянием циклически изменяемых напряжений деформаций реализующихся в процессе работы шины. Поэтому анализ надежности и прогноз ресурса требует наличия достоверной информации о напряженно-деформированном состоянии (НДС) ее внутренних элементов. Следует отметить, что изучение закономерностей формирования НДС в элементах шин представляет сложную научно-практическую проблему вследствие целого ряда особенностей: трехмерная геометрия, многослойная структура, большие прогибы при деформации, наличие контактного взаимодействия с дорожным покрытием, а также наличие криволинейной ортотропии свойств. Таким образом, для определения параметров НДС необходимо задать механические свойства (модуль упругости (Юнга) коэффициент Пуассона, плотность, модуль сдвига и т.п.) для каждого слоя шины в отдельности. Кроме того для некоторых слоев данные свойства имеют различные значения в разных направлениях, т.е. ортотропию (например, для упругости материала следует задать: 3 модуля Юнга, 3 коэффициента Пуассона и 3 модуля сдвига).

Отдельной проблемой в вопросах построения математических моделей шин и проведения на их основе расчетов является проблема учета неоднородной структуры ее отдельных слоев. Так, в шине присутствуют композиционные слои, а именно, каркас и брекер, которые в своём составе имеют металлический и текстильный корды. Поэтому, данные слоя имеют сильную неоднородность своих механических свойств. Явное моделирование корда в слоях шины на современном этапе развития вычислительных средств крайне затруднено. В этой связи применяются специальные предварительные процедуры усреднения свойств в пределах слоев, которые, как результат, будут иметь однородные (гомогенные), но разнонаправленные (ортотропные) свойства [1, 3].

Анализ современных исследований и публикаций. Классическое решение данной проблемы основывается на экспериментальных исследованиях или применении феноменологического закона [1, 2] – правила смеси. Тем не менее, данные подходы позволяют достоверно определять лишь некоторые упругие постоянные, например модуль упругости в направлении ориентации корда, а остальные характеристики находятся с очень большой погрешностью [1].

Таким образом, при теоретическом моделировании пневматической шины самостоятельной и сложной проблемой выступает задача задания свойств материалов ее отдельных слоев.

Цель работы. В данной работе предлагается расчетный способ определения усредненных упругих постоянных неоднородных слоев шины. Предлагаемая методика заключается в проведении ряда вычислительных экспериментов над представительным объёмным элементом (ПОЭ) композиционного материала. ПОЭ моделируется на основе метода конечных элементов (КЭ) и описывает микромеханическую структуру композитного слоя с учетом явно представленных нитей корда, для которых достоверно известны механические и физические свойства (рисунок 1). На основе такой модели

проводится серия вычислительных тестов упрощенного типа – при которых реализуются одноосные распределения деформаций и сложный сдвиг. Для каждого из вычислительных экспериментов определяются поля деформаций и напряжений, которые затем усредняются по объему ПОЭ. В результате усредненные упругие свойства определяются как параметры, связывающие усредненные компоненты тензора деформаций и напряжений, в соответствии с обобщенным законом Гука.

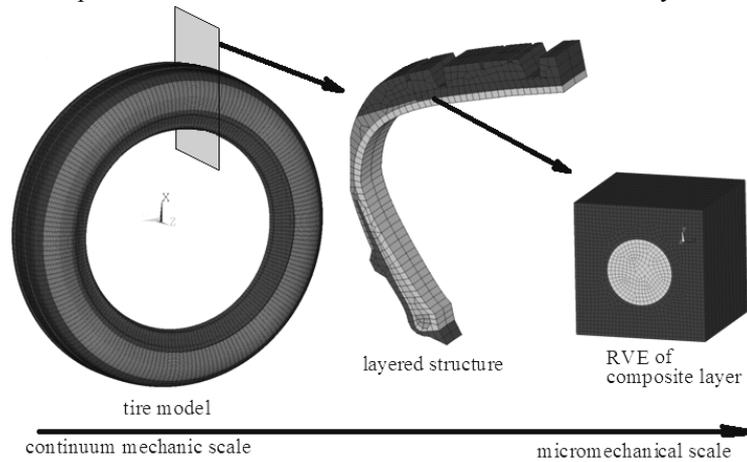


Рисунок 1 – Методология двухмасштабного моделирования пневматических шин

Полученные, таким образом, усредненные свойства могут быть использованы в качестве исходных данных для построения теоретической модели пневматической шины, как самостоятельной конструкции в рамках масштаба континуальной механики.

Материалы и результаты исследований. В работе рассматривается радиальная пневматическая шина модели 205/55R16. Данная шина состоит из различных по свойствам и функциональному назначению слоев с существенно различными физическими свойствами. Основными материалами являются резиновые смеси и корд [1,3]. Кордовая ткань изготовлена из металлических и текстильных нитей. Центральное внимание в данной работе сосредоточено вокруг композитных слоев: каркаса и брекера.

ПОЭ данных композитных слоев моделировался как параллелепипед с включением в его центр цилиндрического фрагмента корда. Размеры ПОЭ были выбраны в соответствии с расстоянием между центрами нитей. КЭ модель ПОЭ представлена на рисунке 1

Для определения усредненных упругих констант в соответствии с методикой, которая представлена в данной работе, необходимо провести симуляцию 4-х тестов. Вычислительные эксперименты проводились в постановке жесткого нагружения, и при этом моделировалось три теста формирующих одноосное деформационное состояние вдоль каждой из осей и сложный сдвиг. Полученные результаты приведены на рисунке 2. Полученные напряжения и деформации для каждого из тестов усреднялись:

$$\langle \sigma_{ij} \rangle = \frac{1}{V} \iiint_V \sigma_{ij} dv, \quad \langle \varepsilon_{ij} \rangle = \frac{1}{V} \iiint_V \varepsilon_{ij} dv, \quad (1)$$

где $\langle \sigma_{ij} \rangle$ и $\langle \varepsilon_{ij} \rangle$ – усредненные компоненты тензов напряжения и деформаций, σ_{ij} и ε_{ij} компоненты тензоров напряжения и деформаций определенные при расчете теста; V – объем ПОЭ.

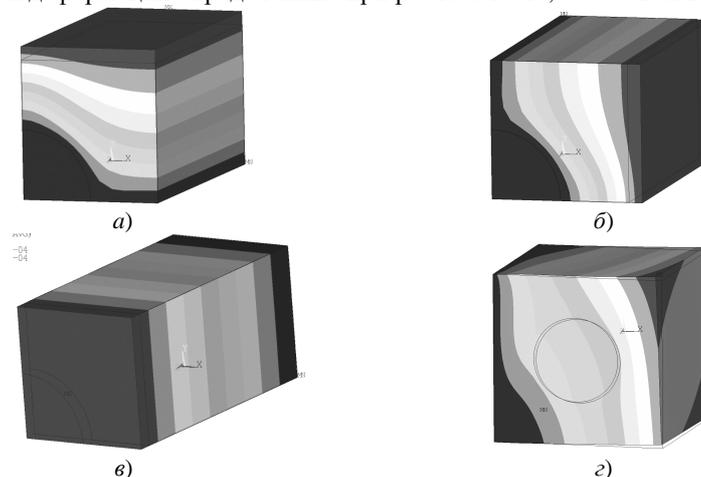


Рисунок 2 – Деформации ПОЭ композитного слоя шины при 4 базовых вычислительных экспериментах

Используя усредненные значения параметров НДС и обобщенный закон Гука, получаем независимые упругие постоянные эквивалентного гомогенного слоя:

$$\{\langle \sigma_{ij} \rangle\} = [C] \cdot \{\langle \varepsilon_{ij} \rangle\}, \quad (2)$$

где $\{\langle \sigma_{ij} \rangle\}$ и $\{\langle \varepsilon_{ij} \rangle\}$ усредненные компоненты тензоров, записанные в виде вектор-столбцов; $[C]$ – матрица жесткости эквивалентного однородного материала. Такая матрица в случае общей ортотропии имеет 9 независимых постоянных: модуля Юнга (E_x, E_y, E_z); коэффициенты Пуассона ($\nu_{xy}, \nu_{xz}, \nu_{yz}$) и модуля сдвига (G_{xy}, G_{yz}, G_{xz}).

Все эти параметры легко могут быть определены из анализа результатов предложенных 4 тестов. Так, первый тест реализует одноосное деформационное состояние и, как следствие, вектор деформаций в системе уравнений (2) имеет только 1 ненулевой элемент, что позволяет выписать 3 линейных независимых уравнения:

$$C_{11} \cdot \langle \varepsilon_{xx} \rangle^I = \langle \sigma_{xx} \rangle^I, \quad C_{12} \cdot \langle \varepsilon_{xx} \rangle^I = \langle \sigma_{yy} \rangle^I, \quad C_{13} \cdot \langle \varepsilon_{xx} \rangle^I = \langle \sigma_{zz} \rangle^I, \quad (3)$$

где C_{ij} компоненты матрицы жесткости материала; $\langle \sigma_{ij} \rangle^I$ и $\langle \varepsilon_{ij} \rangle^I$ – усредненные компоненты напряжений и деформаций, полученные из первого теста (одноосное растяжение).

Последующие тесты, аналогичным образом, позволяют выписать еще 6 уравнений:

$$C_{22} \cdot \langle \varepsilon_{yy} \rangle^{II} = \langle \sigma_{yy} \rangle^{II}, \quad C_{23} \cdot \langle \varepsilon_{yy} \rangle^{II} = \langle \sigma_{zz} \rangle^{II}, \quad C_{33} \cdot \langle \varepsilon_{zz} \rangle^{III} = \langle \sigma_{zz} \rangle^{III}, \quad (4)$$

$$C_{44} \cdot \langle \varepsilon_{yz} \rangle^{IV} = \langle \sigma_{yz} \rangle^{IV}, \quad C_{55} \cdot \langle \varepsilon_{zx} \rangle^{IV} = \langle \sigma_{zx} \rangle^{IV}, \quad C_{66} \cdot \langle \varepsilon_{xy} \rangle^{IV} = \langle \sigma_{xy} \rangle^{IV}. \quad (5)$$

В приведенных выражениях верхний индекс означает номер вычислительного эксперимента, усредненные результаты по НДС для которого используются.

Искомые технические упругие постоянные теперь могут быть выражены из компонент матрицы податливости материала:

$$E_x = \frac{1}{S_{11}}, \quad E_y = \frac{1}{S_{22}}, \quad E_z = \frac{1}{S_{33}}, \quad \nu_{xy} = -E_x \cdot S_{12}, \quad \nu_{xz} = -E_x \cdot S_{13} \quad (6)$$

$$\nu_{yz} = -E_y \cdot S_{23}, \quad G_{xy} = \frac{1}{S_{44}}, \quad G_{yz} = \frac{1}{S_{55}}, \quad G_{xz} = \frac{1}{S_{66}}, \quad (7)$$

где S_{ij} компоненты матрицы податливости, являющейся обратной к $[C]$, т.е. $[S] = [C]^{-1}$.

Полученные усредненные характеристики были применены для моделирования контактного взаимодействия шины с дорогой, которое проводилось в рамках метода КЭ [3]. Рассматривается пневматическая шина, нагруженная внутренним давлением величиной 0,2 МПа, и находящаяся в контакте с дорогой под действием вертикальной нагрузки. На рисунке 3 представлены графические результаты решения данной задачи. Рисунок 3,а демонстрирует картину распределения прогиба элементов шины в контакте с дорожным покрытием, а на рисунке 3,б – поле распределения эквивалентных напряжений в секторе.

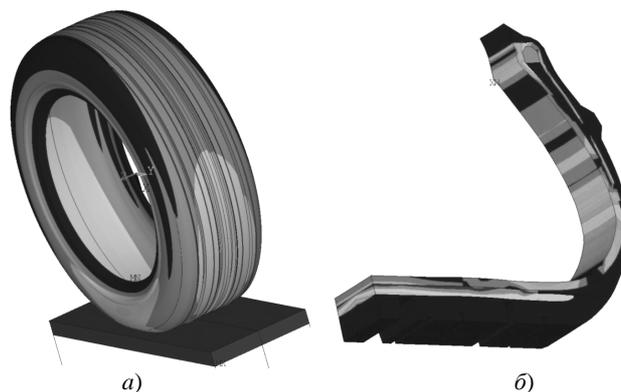


Рисунок 3 – Деформации напряжения в шине при контакте с дорожным покрытием

Выводы. В данной работе рассматривается решение проблемы учета неоднородности свойств композиционных материалов в слоях каркаса и брекера пневматической шины на основе двухмасштабного рассмотрения модели. Ортотропные механические свойства этих слоев определились на основе вычислительных тестов проводимых над представительным объемным элементом слоя. Представлена микромеханическая модель ПОЭ, в которой явно моделируются резиновая матрица и кордная нить. Получены усредненные свойства слоев, применены к моделированию работы шины 205/55R16 при ее обжатии о дорожное полотно.

Библиографический список использованной литературы

1. Clark S.K. (Chairman of Editorial Board) et al The pneumatic tire / S.K. Clark // National Highway Traffic Safety Administration. — USA Dep. Of Transportation, 2006. — P. 707
2. Pelc J. Material modelling in cord-rubber structures / J. Pelc // KGK Kautschuk Gummi Kunststoffe 53. Jahrgang, N. 10, 2000. — P. 561–565
3. Ларин А.А. Компьютерное моделирование пневматической шины с учетом ее внутренней многослойной структуры и ортотропии механических свойств / А.А. Ларин, Ю.В. Арефин // Вестник НТУ «ХПИ». – Харьков: НТУ «ХПИ», 2010. – № 69. – С. 72–78.

Поступила в редакцию 06.06.2013 г.

Ларин А.А., Матейчик В.П., Петрова Ю.А. Застосування двомасштабного підходу до моделювання пневматичних шин

В статті наведені результати розрахункових досліджень з визначення усереднених властивостей композитних шарів пневматичної шини на основі мікромеханічного моделювання, а також результати застосування отриманих даних для моделювання роботи шини моделі 205/55R16.

Ключові слова: пневматична шина, мікромеханіка композитів, ортотропія.

Larin A. A., Mateichik V.P., Petrova Yu.A. Two-scale approach to modelling of pneumatic tyres

The paper deals with results of the computational analysis of the determination of average properties of composite layers of the tire on the basis of a micromechanical modeling. The results of the application of the obtained data for the 205/55R16 tire finite elements modeling are also presented.

Keywords: pneumatic tire, micromechanik of composites, orthotropy.