

А.А.ЛАРИН, канд. техн. наук, ст. преп., НТУ «ХПИ»

Ю.В.АРЕФИН, Автомобильно-дорожный институт, Дон НТУ, Донецк

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ ШИНЫ С УЧЕТОМ ЕЕ ВНУТРЕННЕЙ МНОГОСЛОЙНОЙ СТРУКТУРЫ И ОРТОТРОПИИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

У роботі представлено комп'ютерну модель пневматичної шини, яка враховує наявність всіх внутрішніх шарів шини з їх індивідуальними властивостями, а також їх ортотропію. Представлено методіку визначення механічних властивостей композитних шарів. На основі моделі проведений аналіз статичного напружено-деформованого стану шини під дією внутрішнього тиску повітря. Визначено ступінь напруженості кожного з шарів шини.

In the work the computer model of a pneumatic tire, which takes into account all its internal layers with their individual properties, as well as their orthotropy have been given. A method for determining the mechanical properties of composite layers is represented. Analysis of the static stress-strain state which appears under the influence of the internal air pressure has been carried out on the base of developed model. The stress level of each tire layer has been determined.

Введение. Надежность, функциональные и эксплуатационные характеристики автомобиля во многом определяются параметрами пневматических шин. Это приводит к необходимости выдвигать к ним высокие требования, которые разделяются на следующие группы: безопасность, экономичность, комфортабельность, низкая стоимость [1,2]. Полностью удовлетворить всем приведенным требованиям практически не возможно.

Наиболее важной характеристикой качества шин является срок их службы, который определяется способностью шинных материалов сопротивляться различным видам разрушения. Работоспособность шины зависит от физико-механических свойств материалов, внешних эксплуатационных факторов и ее конструктивных особенностей шины.

Основные виды разрушения элементов пневматических шин связано с явлениями усталости, которые возникают в результате динамических циклических деформаций при ее качении по дороге. Полный комплекс нагрузок, которые воздействуют на движущуюся шину, а это и внутреннее давление, и вертикальное нагружение от веса автомобиля, и влияние неровностей дорожного покрытия и температурное поле – чрезвычайно многообразен и приводит к невероятно сложной математической задачи даже численная симуляция которой в полной мере невозможна на сегодняшний день. В этой связи инженерные расчеты пневматических шины проводятся поэтапно: статическая постановка, анализ линейных автономных колебаний, анализ вынужденных колебаний, задача определения теплообразования, исследование кинетики роста усталостной повреждаемости и, наконец, определение ресурса шины.

При этом на каждом следующем этапе шина должна рассматриваться

как предварительно напряженная конструкция. Особенно это касается вопросов связанных с динамическими задачами. Действительно статическое деформированное состояние определяет положение равновесия системы вокруг, которого рассматриваются колебательные процессы, а начальные напряжения способны совершать работу на возникающих динамических деформациях, а, значит, влиять на жесткость конструкции.

Поэтому, несмотря на то, что надежность пневматической шины в первую очередь определяется ее динамическим поведением, важнейшим этапом анализу является решение задачи ее статического деформирования. При этом точность соответствующего решения имеет особенную важность, так как оно используется в дальнейшем в качестве исходной информации.

1 Объект исследования. В работе рассматривается пневматическая радиальная шина, предназначенная для легковых автомобилей. На рис. 1 приведена геометрическая схема профиля шины и основные определяющие размеры. Исследования проводились для шины украинского производства ОАО «Россава» модель БЦ-43.

Основные параметры шины имеют следующие значения:

общий диаметр колеса $D = 576$ мм; ширина шины $B = 182$ мм;
 диаметр диска $D_{rim} = 329,4$ мм; положение средней линии $H_c = 69,93$ мм;
 высота шина $H = 123,3$ мм; длина беговой части $L = 122$ мм.

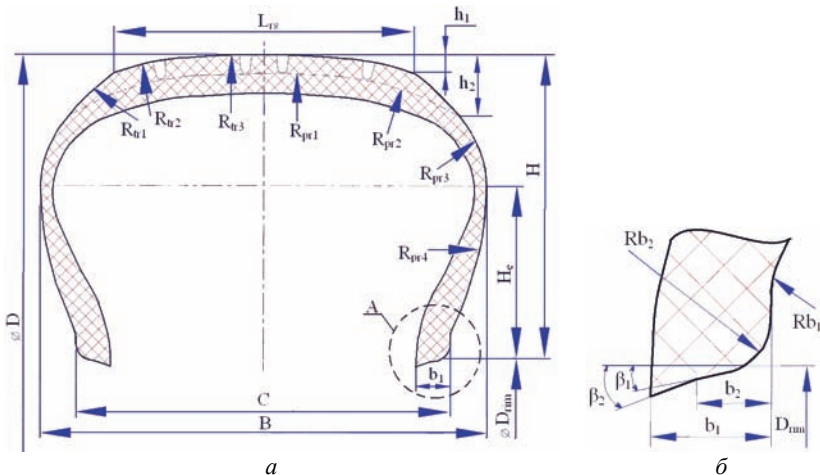


Рисунок 1 – Геометрическая модель профиля поперечного сечения пневматической шины и его основные размеры: а – профиль шины; б – борт

Внутренний контур шины определяется типами и размерами ее слоев. В зависимости от типа шины, ее назначения внутренняя структура может иметь существенные отличия (в первую очередь в размерах и количестве каждого

из видов слоев). Вместе с тем, несмотря на такое разнообразие в зависимости от назначения и положения существует некоторая унификация структурных элементов шины (рис. 2). Шина состоит из беговой части, плечевой зоны, боковой стенки и борта [1,2].

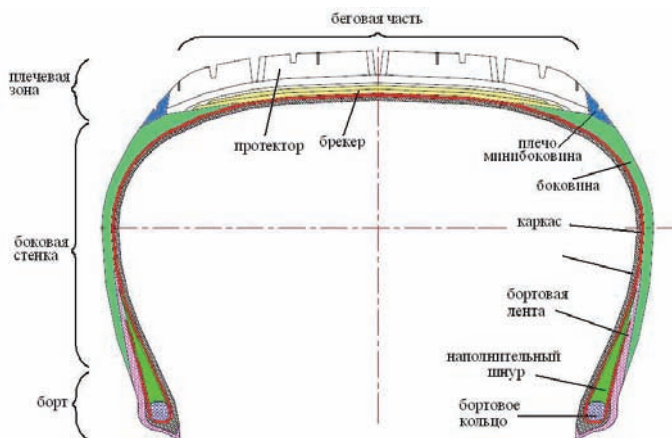


Рисунок 2 – Структурная карта пневматической шины

Так в основании любой шины лежит резинотканевый кордный слой, которых охватывают всю шину и заворачиваются вокруг бортовых колец, образуя ее каркас. У бескамерных шин к внутренней стороне каркаса привулканизирован герметизирующий слой (прослойка).

По периметру каркаса располагается почти нерастяжимый металлический пояс (бортовое кольцо). Бортовая зона благодаря своей форме и высокой жесткости обеспечивает герметичность и надежность посадки шины на диск. Кроме того бортовое кольцо охватывает каркас и трансформирует его первоначально круглый профиль в более плоский.

Беговая часть – это часть шины, которая непосредственно находится во взаимодействии с дорожным покрытием, что определяет особенности ее конструкции: ее поверхность должна обеспечивать наибольшую площадь контакта шины с дорогой (для надежного сцепления) при наименьшей деформации боковой стенки. В связи с этим для увеличения жесткости беговой зоны сверху на каркас накладывается брекер, состоящий из нескольких слоев корда (стального или же из другого материала).

Внутренняя структура шины защищается от воздействия внешней среды резиновыми слоями: протектором и боковиной.

Механические свойства основных резиновых смесей применяемых в различных слоях шины. В основе каждого из слоев пневматической шины лежит некоторая резиновая смесь. В зависимости от функционального на-

значения слоя применяются различные резины, при этом их свойства могут иметь существенные отличия. Так в таблице 1 сведены основные механические свойства резиновых смесей, используемых в исследуемой пневматической шине (БЦ-43).

Таблица 1 – Механические свойства основных резиновых смесей, используемых в исследуемой пневматической шине (БЦ-43)

Назначение резиновой смеси	Мо- дуль Юнга,	Модуль сдвига,	Предел проч- ности при растяжении,	Относительное удлинение при разрыве,
	Е, МПа	G, МПа	σ_B , МПа	δ , %
гермослой	3	1	7,8	350
каркас	6	2	19,6	400
наполнительный шнур	16	5.3	9.8	150
бортовое кольцо	16	5.3	11.3	130
боковина	3,74	1,25	14,7	550-750
брекер	6	2	19,6	350
подпротекторный слой	3	1	16,7	490-650
протектор	3	1	15,7	400
Коэффициент Пуассона резиновых материалов $\nu = 0,49$				
Плотность резиновых материалов $\rho = 1200 \text{ кг/м}^3$				

Как отмечалось ранее среди всех слоев, из которых состоит пневматическая шина слои каркаса и брекера представляют собой резинорезиновые композиты. Основные механические и геометрические параметры матрицы и волокна этих композитов сведены в табл. 2 (некоторые параметры матриц приведены в табл. 1).

В данной работе исследования проводятся в предположении того, что все слои шины можно считать состоящих из сплошного материала с усредненными свойствами. Композитные слои шины при этом представляют собой классический ортотропный материал.

Таблица 2 – Параметры композитных слоев шины (БЦ-43)

	Каркас	Брекер
Жесткость нити корда	1333 Н/нить	24040 Н/нить
Диаметр корда	0,63 мм	0,64 мм
Частота укладки волокон	1130 нить/м	600 нить/м
Угол укладки корда	0	± 70 град
Толщина «обрезинки» (матрицы)	1,17 мм	1,23 мм

Для определения усредненных параметров каркаса и брекера в работе предлагается воспользоваться трехмерным обобщением *Pelc* [3,4] для упрощенного правила смеси *Halpin-Tsai* [4,5,6].

$$E_1 = E_c \nu_c + E_r (1 - \nu_c); \quad E_2 = E_r \frac{(1 + 2\nu_c)}{(1 - \nu_c)}; \quad E_3 = E_2; \quad (1)$$

$$G_{12} = \frac{G_r [G_c + G_r + (G_c - G_r) \nu_c]}{G_c + G_r + (G_c - G_r) \nu_c}; \quad G_{13} = G_{23} = 3G_{12}; \quad (2)$$

$$\nu_{12} = \nu_c \nu_c + \nu_r (1 - \nu_c); \quad \nu_{13} = \nu_{12}; \quad \nu_{23} = 0,48 - \nu_{21}, \quad (3)$$

где $E_c, E_r, G_c, G_r, \nu_c, \nu_r$ – модули упругости, сдвига и основные коэффициенты Пуассона корда и матрицы соответственно; ν_c – объемная доля волокна в композите; индексы 1, 2, 3 – соответствуют направлениям: ориентации волокна, поперечному направлению и направлению из плоскости слоя. Остальные коэффициенты Пуассона определяются исходя из соображений симметрии упругих свойств:

$$\nu_{21} = \nu_{12} \frac{E_2}{E_1}; \quad \nu_{31} = \nu_{13} \frac{E_3}{E_1}; \quad \nu_{32} = \nu_{23} \frac{E_3}{E_2}. \quad (4)$$

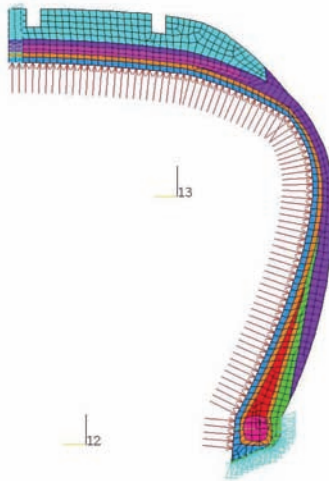


Рисунок 3 – Конечно-элементная модель сечения пневматической шины с учетом ее многослойной структуры и граничных условий

Исследование статического НДС шины в осесимметричной постановке. В работе проведены исследования статического деформирования пневматической шины находящейся под действием внутреннего давления воздуха. Нагружение шины при этом происходит в рамках осевой симметрии, что дает возможность искать решение задачи также в осесимметричной постановке. На рис. 3 приведена плоская КЭ модель шины. Модель учитыва-

ет наличие различных слоев шины, каждый из которых обладает своими механическими свойствами. Композитные слоя (каркас и брекер) заданы не в глобальной, а в специально созданных локальных системах координат, так чтобы ориентация материальных свойств КЭ соответствовала ориентации соответствующих слоев в шине. Кроме осевой симметрии учитывалась также и симметрия поперечного сечения.

На рис. 4, 5 представлены результаты расчетов статического деформирования шины.

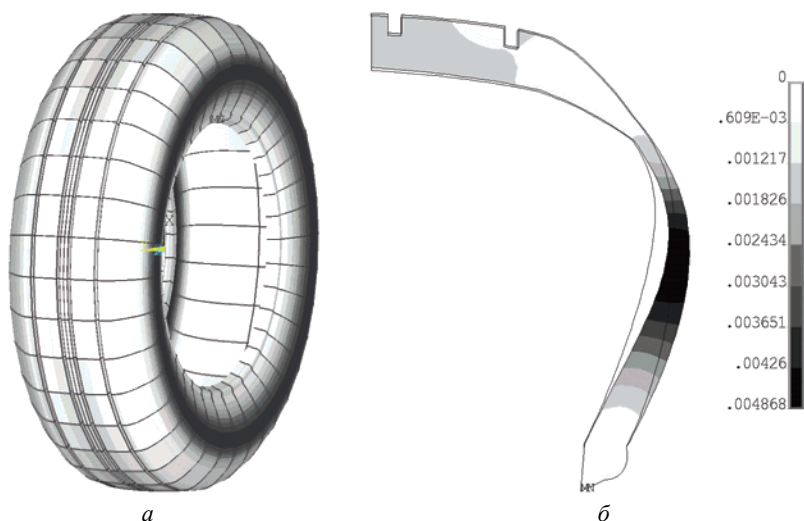


Рисунок 4 – Деформация пневматической шины нагруженной внутренним давлением

Как видно из приведенных результатов напряжения распределяются не равномерно, при этом можно выделить некоторые наиболее нагруженные зоны. Наиболее напряженными местами шины являются бортовое кольцо (оно же совпадает с местом заделки) и каркас, который и воспринимает основное нагружений от внутреннего давления. Исключая из рассмотрения каркас и борт (рис. 5, б), можно видеть, что остальные слои также имеют неравномерное напряженное состояние с наличием концентрации напряжений в районе боковины шины, и слоев брекера. Кроме того следует отметить, что наличие протектора формирует существенную неоднородность напряженного состояния в беговой зоне приводя к наличию областей локализации напряжений в районе самих канавок протектора. Однако следует отметить, что полученные напряжения с точки зрения прочности весьма незначительны.

Выводы. Таким образом, в данной работе представлено компьютерную модель пневматической шины, которая учитывает наличие всех внутренних слоев шины с их индивидуальными свойствами, а также ортотропию компо-

зитных слоев (каркаса и брекера). Представлено методику определения механических свойств ортотропных слоев. На основе модели проведен анализ статического напряженно-деформированного состояния шины возникающего при воздействии внутреннего давления воздуха. Определено степень напряженности, каждого из слоев шины.

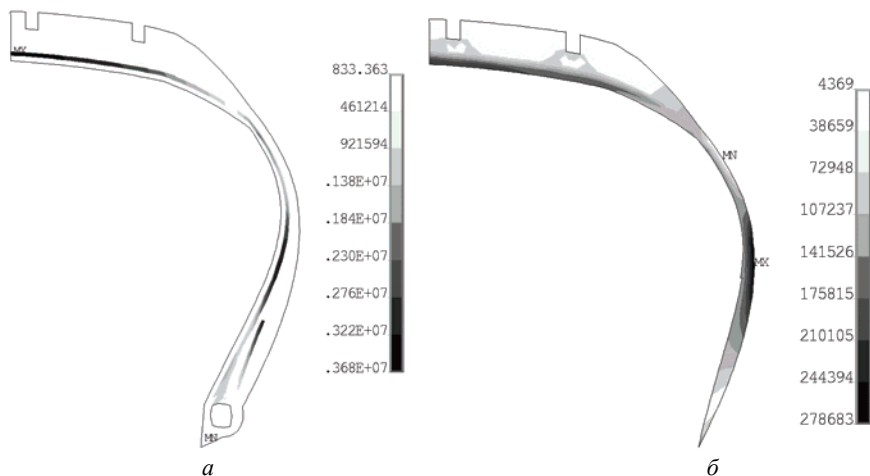


Рисунок 5 – Распределение напряжений в сечении пневматической шины нагруженной внутренним давлением: *а* – распределение по всему сечению; *б* – распределение в боковине, брекере и протекторе.

Список литературы: 1. Бухин Б.Л. Введение в механику пневматических шин / Б.Л. Бухин. – М.: Химия, 1988. – 224 с. 2. Кнороз В.И. Работа автомобильной шины / В.И. Кнороз. – М.: Транспорт, 1978. – 238 с. 3. J. Pelc Material modelling in cord-rubber structures // KGK Kautschuk Gummi Kunststoffstoffe. – 53. Jahrgang, N 10. – 2000. – PP. 561-565. 4. Er. M. Akif Finite element analysis of cornering characteristics of rotating tires // PhD thesis, The Middle East Technical University. – 2003. – PP. 178. 5. S.K. Clark (Chairman of Editorial Board) et al The pneumatic tire // National Highway Traffic Safety Administration. USA Dep. Of Transportation. – 2006. – Pp. 707. 6. Н.А. Алфутов, П.А. Зиновьев, Б.Г. Понов Расчет многослойных пластин и оболочек из композиционных материалов. – М.: Машиностроение, 1984. – 264 с.

Поступила в редколлегию 25.11.2010.