



МЕХАНИКА МОБИЛЬНЫХ МАШИН

УДК 539.3; 621.891; 691.175

А.В. ХОТЬКО

начальник отдела расчетных исследований механики шин управления проектирования и конструирования шин инженерно-технического центра¹

E-mail: hotkoav2017@gmail.com

С.В. ШИЛЬКО, канд. техн. наук, доц.

заведующий лабораторией «Механика композитов и биополимеров»²

E-mail: shilko_mpri@mail.ru

С.Н. БУХАРОВ, канд. техн. наук

заведующий сектором «Виброакустика материалов и узлов трения машин»²

E-mail: sbuharov@tut.by

¹ОАО «Белшина», г. Бобруйск, Республика Беларусь

²Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси, г. Гомель, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 02.10.2020.

ВОЗМОЖНОСТИ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ АВТОМОБИЛЬНОЙ ШИНЫ ПО КРИТЕРИЮ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ РАВНОПРОЧНОСТИ

Предложена процедура расчетного определения внутреннего профиля и оптимального распределения материалов пневматической автомобильной шины в конфигурации пресс-формы. Для адекватного описания упруго-диссипативных свойств шинных резин и резинокордных композитов рассматривается модель нелинейного упругого деформирования Муни–Ривлина, вязкоупругая модель Прони, а также экспериментальные данные статических и динамических испытаний. Описан алгоритм конечно-элементного анализа напряженно-деформированного состояния легковой автомобильной шины в программном комплексе MSC.Marc, и приведены результаты численного решения прикладных задач о посадке шины на обод и ее нагружении рабочим давлением, а также о контактном взаимодействии легковой шины с дорожным покрытием при максимальной эксплуатационной нагрузке в состоянии покоя и при стационарном качении со скоростью 90 км/ч. Установлено, что контактное нагружение шины при взаимодействии с дорожным покрытием не приводит к существенному отличию поля деформаций в зоне, диаметрально противоположной зоне контакта, от такового для шины, смонтированной на обод и нагруженной избыточным рабочим давлением. При этом характер распределения деформаций в радиальном сечении вблизи зоны контакта шины с дорожным покрытием в условиях обжатия и стационарного качения одинаков. Выявлены области концентрации эквивалентных напряжений и деформаций в бортовой зоне шины и зоне кромок брекера. Для оперативного сравнения конкурирующих вариантов конструкции шины рекомендовано вычислять средние значения плотности полной энергии деформации за оборот колеса. Разработанные расчетные методы позволяют прогнозировать эксплуатационные характеристики автомобильных шин на стадии проектирования и апробированы в производстве указанных изделий.

Ключевые слова: автомобильная шина, резинокордные композиты, напряженно-деформированное состояние, равновесная конфигурация, вязкоупругость, проектный и поверочный расчет, метод конечных элементов

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2020-4-53-11-18>

Введение. Автомобильные шины (АШ) являются весьма сложными и ответственными издели-

ями. При их разработке конструктору необходимо обеспечить конкурентно значимые эксплуатаци-

онные показатели, включая коэффициенты запаса статической прочности нитей корда и усталостной прочности шинных резин; параметры, влияющие на устойчивость и управляемость шины, коэффициенты сопротивления качению и сцепления шины с дорожным покрытием, а также износостойкость протектора. С этой целью привлекаются методы композиционного материаловедения, механики эластомерных композитов, стандартных механических и трибологических тестов, а также лабораторно-дорожных испытаний (ЛДИ), изложенные в монографиях отечественных и зарубежных ученых [1–4].

При всей значимости экспериментальных исследований, например ЛДИ по определению сопротивления качению [5], в последние годы возрастает роль расчетной оптимизации АШ. Оптимально спроектированная шина должна соответствовать перечисленным выше показателям и выводиться из эксплуатации при достижении регламентированного износа протектора. Однако сложность проектирования АШ связана с известным противоречием, возникающим при выполнении указанных требований, поэтому при оптимизации конструкции и выбора материалов шины приходится искать компромиссное решение.

Целью исследования является расчетное определение оптимального профиля и распределения материалов пневматической автомобильной шины в конфигурации пресс-формы на стадии проектирования.

В статье выполнена расчетная оптимизация параметров напряженно-деформированного состояния АШ при различных режимах нагружения, включая показатели радиальной, крутильной, боковой, угловой и продольной жесткости. Численные эксперименты проводились методом конечных элементов в программной среде MSC.Marc с учетом особенностей деформационного поведения резинокордных композитов.

Возможности оптимизации профиля шины и распределения материалов в конфигурации пресс-формы. Для анализа напряженно-деформированного состояния АШ в программном комплексе MSC.Marc необходимо задать координаты профиля шины и внутренних границ ее компонентов в радиальном сечении. Предварительно выполняются проектный и поверочный расчеты. В проектном расчете определяется равновесная конфигурация шины, исходя из заданных габаритов по ободу. Предпочтителен расчет равновесной конфигурации по средней линии каркаса, но в работах [1, 3, 6] допускается расчет равновесной конфигурации по внутреннему контуру профиля шины, что и сделано в настоящей статье при решении примеров.

Далее определяются усилия в нитях корда шины брекера и каркаса, а также в проволоке бортовых колец. При расчете усилий выбирается марка материала корда, число слоев обреза-

ного корда в брекере и каркасе, марка бортовой проволоки и конструкция бортового кольца. Определяется длина нити корда от точки на экваторе шины до точки обода. Зная длину нити корда, можно определить оптимальную ширину брекера и внутреннего профиля шины в конфигурации пресс-формы. Профиль шины в конфигурации пресс-формы должен быть близок к равновесному, что обеспечит равномерное натяжение нитей корда в каркасе, позволит применить гипотезу прямых нормалей при расчете резиновых деталей и гарантирует минимальные перетекания резины при вулканизации.

При поверочном расчете по методике [5] определяют варианты внутреннего профиля шины в конфигурации прессформы, варьируя положение точки брекера и угол наклона нити корда в брекере. Рисунок 1 иллюстрирует решение задачи проектного и поверочного расчетов для легкой шины типоразмера 235/55R17. В таблице на рисунке 1 приведены значения усилий в нитях корда каркаса и брекера. По геометрическим данным, радиусам кривизны, полученным в результате поверочного расчета, можно построить внутренний профиль шины, а затем определить распределение материалов с учетом прессовок по толщине и ширине, расчет которых описан в работе [1]. Достоинством описанного алгоритма расчета является то, что профиль шины в конфигурации прессформы обеспечит вулканизируемой шине в данной пресс-форме заданные габаритные размеры на ободу по ширине и диаметру в соответствии со стандартами ETRTO, TRA и ГОСТ. В частности, на рисунке 2 изображен вариант профиля шины 235/55R17, который получен описанным выше способом.

Учет особенностей деформационных свойств резинокордных материалов. Принципиальное значение имеет адекватное описание механических свойств шинных материалов. Так, направленно-армированные резинокордные композиты брекера, каркаса и бортовых колец являются анизотропными материалами, что подразумевает учет влияния угла наклона нитей корда и их плотности в слое при определении жесткости шины. При изготовлении шины на стадиях сборки и вулканизации продолжается формирование каркаса и брекера. Это приводит к изменению углов наклона и плотности нитей в слое, заданных на плоском сборочном барабане. Таким образом, в вулканизированной шине угол наклона нити (если он не равен 0° к меридиональному направлению), а также плотность нитей в каркасе и брекере зависят от радиальной координаты.

На основе теории сетчатых оболочек [1, 2] были получены уравнения, описывающие изменение плотности нитей и угла наклона нити от радиальной координаты [6], а в программном продукте MSC.Marc [7] использованы расчетные возможности в виде модели деформирования и оболоч-

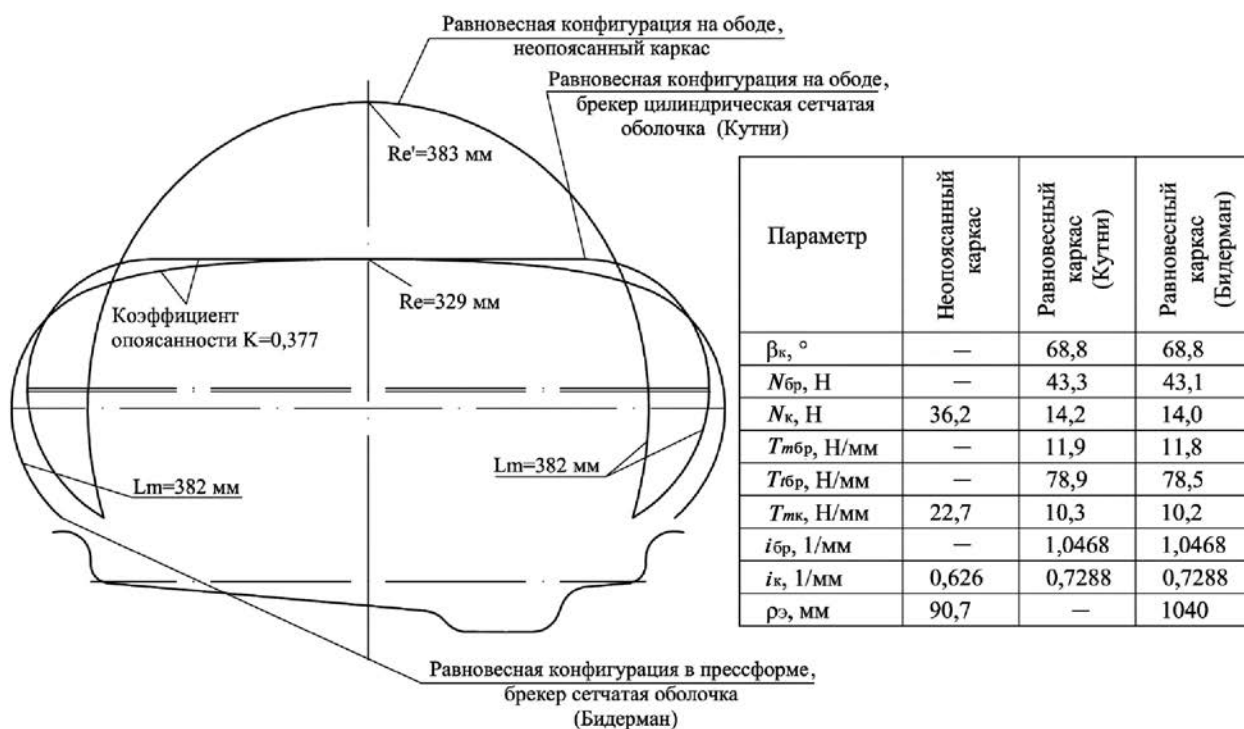


Рисунок 1 — Результаты проектного и поверочного расчетов шины 235/55R17
 Figure 1 — Results of design and check calculations for tire 235/55R17

чечных элементов Rebar, позволяющие описать исследуемые резинкордные композиты. В частности, на радиусе шины 331,6 мм задавались следующие параметры армирующего материала (металлокорда) 1-го слоя брекера шины 235/55R17, имеющего плотность 3,96 г/мм³, модуль Юнга 97,38 ГПа и коэффициент Пуассона 0,3: плотность нитей — 1,047 1/мм, площадь поперечного сечения нити — 0,2827 мм², угол наклона нитей — 68,8°. Аналогично описывались остальные слои брекера, каркаса и бортовых колец.

Для проверки адекватности математического описания свойств Rebar материала была построена модель оболочки, состоящей из двух слоев обрешеченного корда [6]. Напряженно-деформированное состояние в нитях корда и равновесная конфигурация оболочки определялись по теории сетчатых

оболочек и методом конечных элементов (MSC. Marc). Сопоставление аналитического и численного решений показало, что отклонение расчетного меридиана не превышает 2 %, угла наклона нити корда вдоль меридиана — 3 %, распределения усилий в нитях корда вдоль меридиана — 5 %.

Далее рассмотрим математическое описание физико-механических свойств резиновой матрицы резинкордных систем и резин различного назначения шины. При эксплуатации радиальных шин деформации резины достигают 20 %, а шин диагональной конструкции — 40 %. Это приводит к необходимости использования моделей, учитывающих физическую нелинейность резины [8]. В частности, реализованная в программном обеспечении деформационного анализа эластомеров MSC.Marc [9] феноменологическая модель Муни–Ривлина [10], согласно которой потенциальная энергия резины при нагружении выражается через первый и второй инварианты тензора деформаций, имеет вид:

$$W = C_{10} \cdot (I_1 - 3) + C_{01} \cdot (I_2 - 3), \quad (1)$$

где упругие константы C_{10} и C_{01} определяются по результатам статических испытаний на одноосное и двухосное нагружение (рисунок 3); плоский и чистый сдвиг (рисунок 4 a) и объемное сжатие (см. рисунок 4 b)

Механические испытания должны проводится при скорости деформации, близкой к эксплуатационной в диапазоне относительных удлинений от 0 до 100 % после 5–10 циклов нагрузки/разгрузки для нивелирования эффекта размягчения Маллинза (рисунок 5).

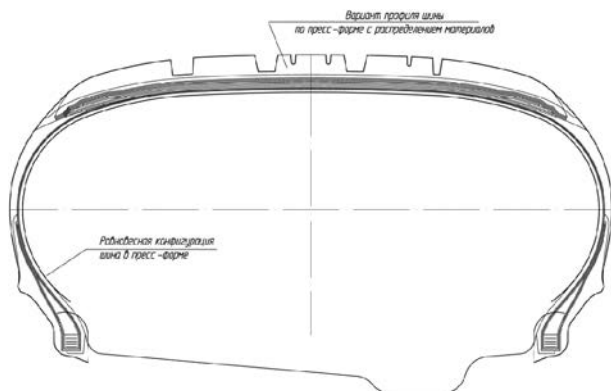


Рисунок 2 — Профиль шины 235/55R17 с распределением материалов в конфигурации пресс-формы
 Figure 2 — A profile of the tire 235/55R17 with distribution of materials in mold configuration

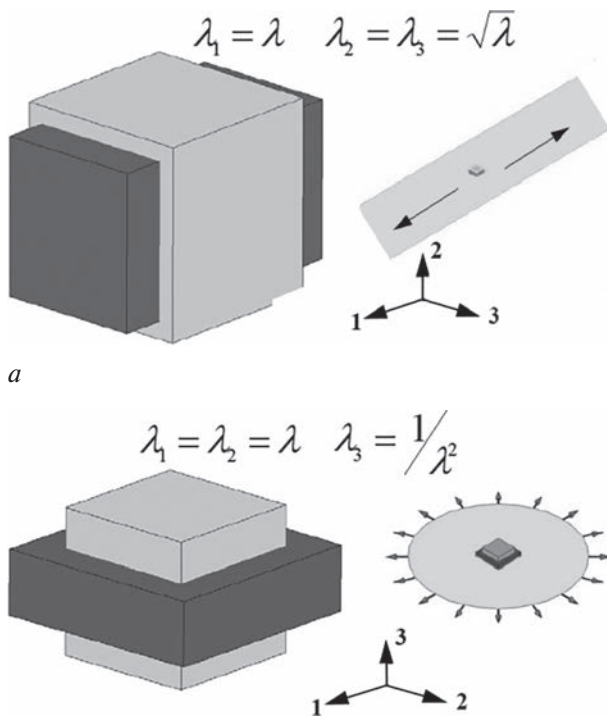


Рисунок 3 — Схемы испытаний на растяжение:
 a — одноосное; b — двухосное
 Figure 3 — Schemes of tensile tests: a — uniaxial; b — biaxial

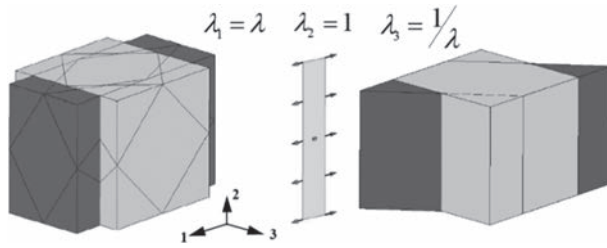


Рисунок 4 — Схемы испытаний:
 a — плоский и чистый сдвиг; b — объемное сжатие
 Figure 4 — Test schemes: a — flat and pure shear;
 b — bulk compression

Так, резиновой смеси брекера плотностью 1,23 г/см³ соответствуют следующие упругие характеристики: объемный модуль упругости — 7895 МПа, модуль сдвига — 0,7896 МПа, модуль упругости — 2,3684 МПа, параметры модели Муни–Ривлина — $C_{10} = 0,7506$ МПа и $C_{01} = 0,039$ МПа.

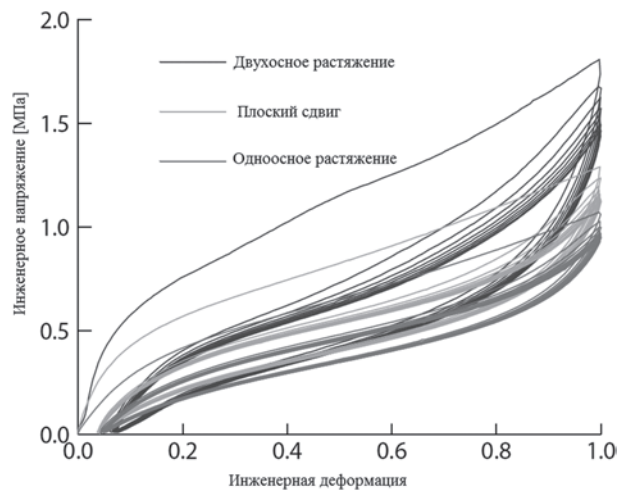


Рисунок 5 — Диаграммы деформирования резины при плоском сдвиге, одноосном и двухосном растяжении
 Figure 5 — Stress-strain diagrams of rubber in plane shear, uniaxial and biaxial tension

На рисунке 6 теоретические зависимости по линейно-упругой модели и модели Муни–Ривлина сопоставлены с диаграммой одноосного растяжения, полученной после 10-го цикла нагружения.

Помимо учета физической нелинейности, расчет гистерезисных потерь в различных зонах шины и коэффициента сопротивления качению при стационарном качении подразумевает адекватное описание вязких свойств резиновых смесей в рамках теории вязкоупругости [11] с возможностью регулирования деформационных характеристик резин введением наноразмерных наполнителей в нужном объеме [12].

- Для вязкоупругого анализа в условиях малых и больших деформаций в программе MSC.Marc имеются следующие средства моделирования [9]:
- мультипликативное разложение функции энергии деформации;
 - модель частотно-зависимого демпфирования;
 - модель демпфирования, зависящего от частоты и амплитуды;
 - вязкоупругая модель Бергстрема–Бойса;
 - мультиреологическая модель.

Далее рассмотрим модель, основанную на мультипликативном разложении функции энергии деформации, когда скорость релаксации не зависит

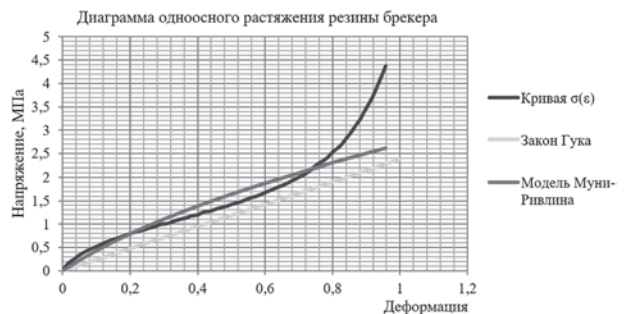


Рисунок 6 — Экспериментальные и расчетные диаграммы одноосного растяжения резины брекера
 Figure 6 — Experimental and calculated diagrams of uniaxial tension of the breaker rubber

от величины нагрузки, причем релаксация является чисто девиаторной и резина сохраняет свой объем в процессе релаксации:

$$W(E_{ij}, t) = W(E_{ij}) \cdot R(t), \quad (2)$$

где $W(E_{ij})$ — стандартная функция энергии деформации Муни–Ривлина или Огдена для мгновенной деформации; $R(t)$ — функция релаксации в виде ряда Прони:

$$R(t) = 1 - \sum_{n=1}^N \delta^n \cdot \left(1 - \exp\left(-t/\lambda^n\right)\right), \quad (3)$$

где δ^n — безразмерный множитель; λ^n — постоянная времени.

Для определения параметров модели необходимо провести вышеперечисленные испытания по определению параметров модели Муни–Ривлина и испытание на релаксацию. В программе MSC.Marc по экспериментальной зависимости $\sigma(t)$ рассчитываются параметры функции релаксации в виде ряда Прони.

Анализ напряженно-деформированного состояния легковой пневматической шины 235/55R17 в различных режимах нагружения. Рассмотрим решение задачи о стационарном качении легковой шины 235/55R17 в программе MSC.Marc. На первом этапе моделируется посадка с натягом шины на обод и ее нагружение рабочим давлением. Для резины были использованы 4-узловые прямоугольные конечные элементы, для моделирования корда — 2-узловые оболочечные элементы. На втором этапе для решения задачи о контактном взаимодействии шины с плоским дорожным покрытием на базе осесимметричной конечно-элементной модели с помощью опции Expand выполнялся расчет в трехмерной постановке, позволяющий определить нагрузочные характеристики шины и ее радиальную, боковую, продольную, крутильную и угловую жесткость. На третьем этапе решалась задача о стационарном качении шины со скоростью 90 км/ч (можно также решать задачи разгона, торможения и качения шины с боковым уводом).

На рисунке 7 изображена осесимметричная конечно-элементная модель шины 235/55R17 с выделением различных шинных материалов (деталей шины) в радиальном сечении.

На рисунке 8 *a* представлены результаты решения осесимметричной задачи, на рисунке 8 *b* — деформации сжатия шины при максимальной эксплуатационной нагрузке. Результаты решения задачи о стационарном качении АШ по дорожному покрытию со скоростью 90 км/ч даны на рисунке 9.

Анализ полученных распределений позволяет установить следующее. Контактное нагружение шины при взаимодействии с дорожным покрытием не приводит к существенному отличию поля деформаций в зоне, диаметрально противоположной зоне контакта, от такового для шины, смонтиро-

ванной на обод и нагруженной избыточным рабочим давлением. Характер распределения деформаций в радиальном сечении вблизи зоны контакта шины с дорожным покрытием в режиме обжатия и стационарного качения одинаков.

В радиальном сечении шины выявляются области концентрации деформаций: бортовая зона шины (точка обода) и зона кромок брекера (точка брекера). Как правило, в них происходит разруше-

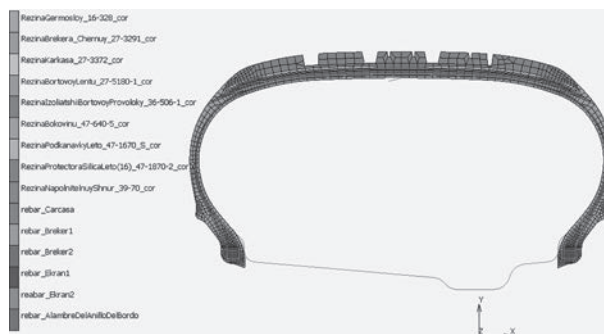


Рисунок 7 — Распределение материалов в радиальном сечении легковой шины 235/55R17
Figure 7 — Distribution of materials in the radial section of the passenger car tire 235/55R17

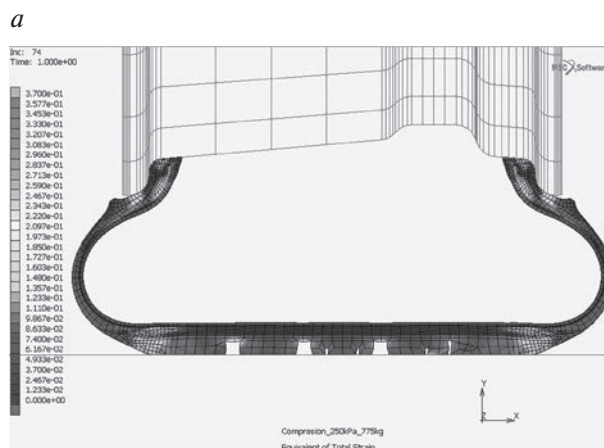
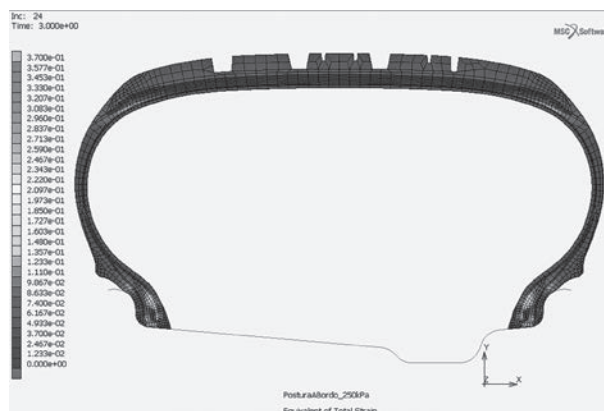
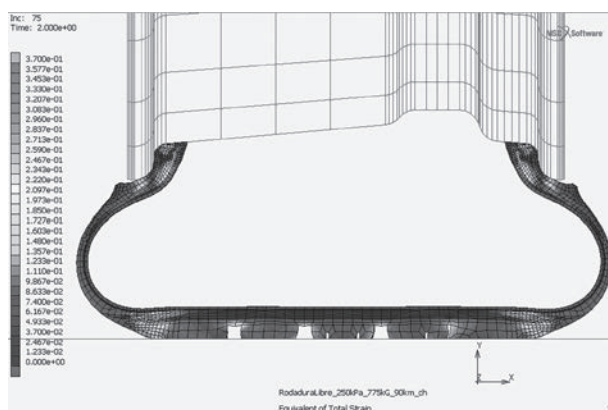
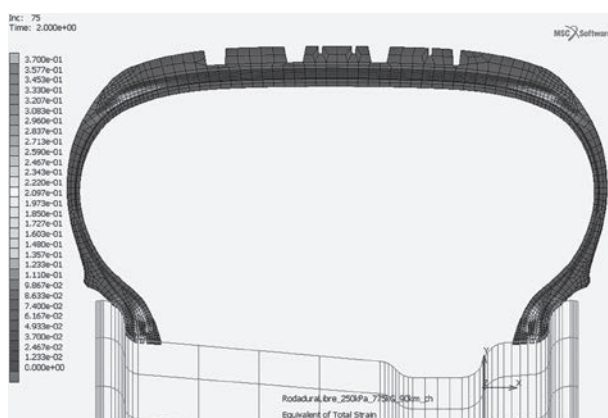


Рисунок 8 — Распределение эквивалентных деформаций в радиальном сечении шины: *a* — при посадке шины на обод; *b* — центральное сечение зоны контакта с дорожным покрытием при статическом нагружении
Figure 8 — Distribution of equivalent strains in the radial section of the tire: *a* — when the tire is seated on the rim; *b* — central section of contact area with road surface under static loading



a



b

Рисунок 9 — Распределение эквивалентных деформаций в радиальном сечении шины при стационарном качении:
a — в центральном сечении шины в зоне контакта с дорожным покрытием; *b* — в сечении, диаметрально противоположном сечению *a*

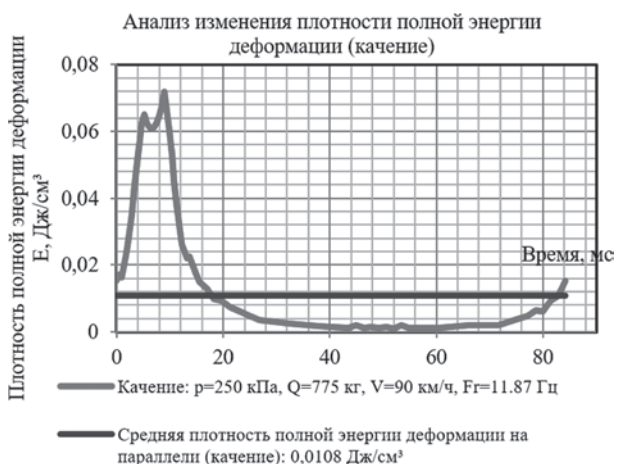
Figure 9 — Distribution of equivalent strains in the radial section of the tire at the stationary rolling:
a — in central section of the tire trough contact area with the road surface; *b* — in the section opposite diametrically to the section *a*

ние материала при эксплуатации шин. Очевидно, для улучшения эксплуатационных характеристик шины конструктор должен принять меры, обеспечивающие снижение уровня эквивалентных деформаций и напряжений в указанных местах. В узлах конечно-элементной сетки, расположенных в этих зонах, целесообразно вычислять плотность полной энергии деформации вдоль параллели. Это позволяет определить средние значения плотности полной энергии деформации за оборот шины (рисунок 10 *a*), что позволяет оперативно сравнивать конкурирующие варианты конструкции шины.

В ходе решения рассмотренной задачи о стационарном качении распределяется частота вращения шины в режиме свободного качения. В рассмотренном примере для легковой шины 235/55R17, катящейся со скоростью 90 км/ч, частота вращения составляет 11,87 Гц. Зная характер изменения экстремальных (максимальных и минимальных) эквивалентных деформаций, напряжений и плотности полной энергии деформации на параллели, можно пересчитать пространственные



a



b

Рисунок 10 — Зависимости плотности полной энергии деформации: *a* — от дуговой координаты; *b* — от времени
Figure 10 — Dependencies of the density of the total strain energy on:
a — the arc coordinate; *b* — the time

частоты во временные и получить временную характеристику изменения вышеуказанных параметров напряженно-деформированного состояния за один оборот шины (см. рисунок 10 *b*). Это позволит в лабораторных условиях провести усталостные испытания и динамический механический анализ образцов лабораторных резин и образцов, вырезанных из шин, и оценить качество шинных резин и конструктивных вариантов, опираясь на результаты виртуального моделирования без выпуска опытной партии шин.

Разработанные методики расчета успешно применяются при проектировании новых моделей АШ. Так, специалистами ОАО «Белшина» была разработана и поставлена на серийное производство летняя легковая шина типоразмера 235/55R17 с индексом нагрузки 99 (775 кг) и категорией скорости *W* (270 км/ч). При ее проектировании были применены описанные выше расчетные исследования, созданы и отработаны технологии проектирования и конструирования профиля шины радиальной и диагональной конструкции с оптимальным распределением материалов в конфигу-

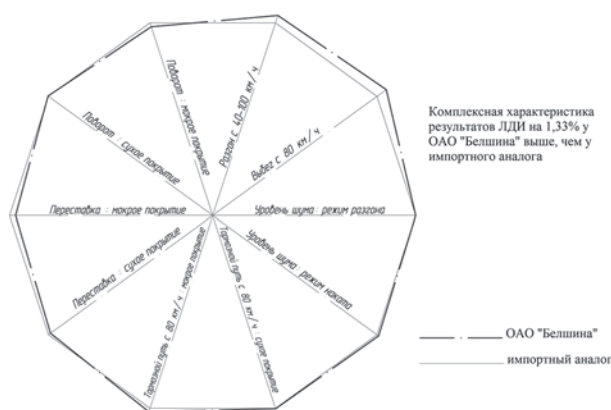


Рисунок 11 — Сравнение результатов испытаний шин типоразмера 235/55R17 производства ОАО «Белшина» и импортного аналога

Figure 11 — Comparison of the test results of tires of standard size 235/55R17 produced by BELSHINA JSC and imported analog

рации пресс-формы, выполнен обратный инженерный анализ АШ.

На рисунке 11 приведена диаграмма эксплуатационных характеристик модели 235/55R17 производства ОАО «Белшина» в сравнении с импортной шиной-аналогом. Данные для диаграммы получены при проведении ЛДИ.

Описанные выше методы расчета были также использованы специалистами ОАО «Белшина» с целью устранения рекламационных дефектов легковой шины типоразмера 225/45R17 и грузовых ЦМК шин типоразмеров 315/80R22,5; 315/70R22,5 и 295/80R22,5. Для существующих пресс-форм разработаны профили шины с улучшенным распределением материалов в конфигурации пресс-формы и конструкторско-технологические карты. Шины опытных партий успешно прошли программы предварительных и приемочных стендовых испытаний и были поставлены на серийное производство.

Заключение. Разработанные методы являются расчетной базой для поиска оптимальной конфигурации и распределения материалов автомобильной шины, позволяя прогнозировать комплекс ее эксплуатационных характеристик на стадии проектирования.

Исследование выполнено в рамках п. 1.3.2 Программы научного сопровождения по обеспечению создания новых типоразмеров шин ОАО «Белшина» (2020–2023) и х/д И27/2020 «Характеризация вязкоупругих свойств шинных резин ЦМК ЗМШ».

Список литературы

1. Автомобильные шины (конструкция, расчет, испытание, эксплуатация) / В.Л. Бидерман [и др.]. — М.: Гос. научн.-техн. изд-во хим. лит., 1963. — 353 с.
2. Mechanics of Pneumatic Tires, Ed. S.K. Clark. — Washington: National Bureau of Standards, 1971. — 853 p.
3. Бухин, Б.Л. Введение в механику пневматических шин / Б.Л. Бухин. — М.: Химия, 1988. — 222 с.
4. Nakajima, Y. Advanced Tire Mechanics / Y. Nakajima. — Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2019. — 1264 p.
5. Определение сопротивления качению автомобильных шин в зависимости от условий эксплуатации. Ч. 1. Методика многофакторного эксперимента / В.В. Можаровский [и др.] // Трение и износ. — 2007. — Т. 28, № 2. — С. 151–157.
6. Хотько, А.В. Применение теории сетчатых оболочек при проектировании автомобильных шин / А.В. Хотько, С.В. Шилько // Механика машин, механизмов и материалов. — 2020. — № 1(50). — С. 5–11.
7. User Documentation. Vol. A: Theory and User Information: Copyright ©2017 MSC Software Corporation.
8. Koutny, F. Geometry and Mechanics of Pneumatic Tires / F. Koutny. — Zlin, CZE, 2007. — 139 p.
9. User Documentation. MAR10 Experimental Elastomer Analysis: Copyright ©2017 MSC Software Corporation.
10. Rivlin, R.S. Large Elastic Deformations of Isotropic Materials, VII, Experiments on the Deformation of Rubber / R.S. Rivlin, D.W. Saunders // Phil. Trans. Roy. Soc., London. — 1951. — 243(Pt. A). — Pp. 251–288.
11. Cristensen, R.M. Theory of Viscoelasticity / R.M. Cristensen. — 2nd edition. — New York: Academic Press, 1982. — 378 p.
12. Ivanov, L.A. The Inventions in Nanotechnologies as Practical Solutions. Part II / L.A. Ivanov, A.V. Demenev, S.R. Muminova // Nanotechnologies in Construction. — 2019. — Vol. 11, No. 2. — Pp. 175–185.

KHOTKO Alexander V.

Head of the Division of Calculation Studies of Tire Mechanics of the Department of Tire Design and Construction of the R&D Center¹

E-mail: hotkoav2017@gmail.com

SHIL'KO Sergey V., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.

Head of the Laboratory “Mechanics of Composites and Biopolymers”²

E-mail: shilko_mpri@mail.ru

BUHAROV Sergey N., Ph. D. in Eng.

Head of the Sector “Vibroacoustics of Materials and Tribojoints of Machines”²

E-mail: sbuharov@tut.by

¹BELSHINA JSC, Bobruisk, Republic of Belarus

²V.A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of the NAS of Belarus, Gomel, Republic of Belarus

POSSIBILITIES FOR OPTIMAL DESIGN OF A CAR TIRE BASED ON A CRITERION OF SPATIAL STRENGTH BALANCE

A procedure is proposed for calculating the internal profile and optimal distribution of materials for a pneumatic car tire in a mold configuration. To adequately describe the elastic-dissipative properties of tire rubbers and rubber-cord composites, nonlinear elastic deformation Mooney–Rivlin model and viscoelastic Prony model as well as experimental data of static and dynamic tests are considered. An algorithm for finite element analysis of the stress-strain state of a passenger car tire is described in the MSC.Marc software package, and results of numerical solution of applied problems are presented on the tire landing on the rim and its loading with working pressure, as well as on the contact interaction of a passenger car tire with the road surface at maximum operating load at rest and during stationary rolling at a speed of 90 km/h. It was found that the contact loading of the tire when interacting with the road surface does not lead to a significant difference in the deformed state in the zone opposite diametrically to the contact zone from that for a tire mounted on a rim and loaded with excess operating pressure. In this case, the nature of the distribution of strains in the radial section near the contact zone of the tire with the road surface is the same under conditions of compression and stationary rolling. Areas of concentration of equivalent stresses and strains in the bead zone of the tire and in the zone of the edges of the breaker are revealed. For a quick comparison of competing tire designs, it is recommended to calculate the average values of the total strain energy density per wheel revolution. The developed calculation methods make it possible to predict the performance characteristics of automobile tires at the design stage and are tested in the manufacturing of these products.

Keywords: car tire, rubber-cord composites, stress-strain state, equilibrium configuration, viscoelasticity, design and check calculation, finite element method

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2020-4-53-11-18>

References

1. Biderman V.L., Guslitser R.L., Zakharov S.P., Seleznev I.I. *Avtomobilnye shiny (konstruktsiya, raschet, ispytanie, ekspluatatsiya)* [Automobile tires (design, calculation, testing, operation)]. Moscow, Gosudarstvennoe nauchno-tekhnicheskoe izdatelstvo khimicheskoy literatury Publ., 1963. 353 p. (in Russ.).
2. *Mechanics of Pneumatic Tires*. Washington National Bureau of Standards, 1971. 853 p.
3. Bukhin B.L. *Vvedenie v mekhaniku pnevmaticheskikh shin* [Introduction to mechanics of pneumatic tires]. Moscow, Khimiya Publ., 1988. 222 p. (in Russ.).
4. Nakajima Y. *Advanced Tire Mechanics*. Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2019. 1264 p.
5. Mozharovskii V.V., Shil'ko, S.V., Anfinogenov S.B., Khot'ko A.V. *Opredelenie soprotivleniya kacheniyu avtomobilnykh shin v zavisimosti ot usloviy ekspluatatsii. Chast 1. Metodika mnogofaktornogo eksperimenta* [Determination of resistance to rolling of tires in dependence on operating conditions. Part 1. Method of multifactorial experiment]. *Trenie i iznos*, 2007, vol. 28, no. 2, pp. 151–157 (in Russ.).
6. Khotko A.V., Shil'ko S.V. *Primenenie teorii setchatykh obolochek pri proektirovanii avtomobilnykh shin* [Application of the theory of gridshells in the design of diagonal automobile tires]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2020, no. 1(50), pp. 5–11 (in Russ.).
7. *User Documentation. Vol. A: Theory and User Information*. Copyright ©2017 MSC Software Corporation.
8. Koutny F. *Geometry and mechanics of pneumatic tires*. Zlin, CZE, 2007. 139 p.
9. *User Documentation. MARI0 Experimental Elastomer Analysis*. Copyright ©2017 MSC Software Corporation.
10. Rivlin R.S., Saunders D.W. Large elastic deformations of isotropic materials, VII, Experiments on the deformation of rubber. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1951, vol. 243(Pt. A), pp. 251–288.
11. Cristensen R.M. *Theory of viscoelasticity*. Academic Press, New York, 1982. 378 p.
12. Ivanov L.A., Demenev A.V., Muminova S.R. The inventions in nanotechnologies as practical solutions. Part II. *Nanotechnologies in construction*, 2019, vol. 11, no. 2, pp. 175–185.