

Расчет и конструирование

УДК 629.3.032; 539.67

DOI: 10.14529/engin170101

МНОГОСПИЦЕВАЯ БЕЗВОЗДУШНАЯ ШИНА ИЗ КОМПОЗИТА: ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ*

Р.Р. Абдрахимов, А.В. Игнатова, С.Б. Сапожников

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск

В работе представлен анализ установившегося теплового состояния композитных спиц безвоздушного колеса (шины) при движении. Нагрев спиц на высоких скоростях движения – один из основных недостатков безвоздушных колес, проявляемый вследствие наличия внутреннего трения в материалах, поглощающего часть энергии деформации. Повышенная температура материалов колеса оказывает существенное влияние на его работоспособность, так как снижает механические свойства материалов, создает дополнительное термонапряженное состояние и ведет к деградации материала. Рациональным решением данного вопроса является использование современных расчетных методов вместе с применением композитных материалов, обладающих малым внутренним гистерезисным демпфированием.

Рассеянная энергия деформирования, представляющая собой площадь петли гистерезиса, определяется вязкоупругими свойствами материала и деформациями при нагружении. Необходимые для расчета теплового состояния вязкоупругие свойства стеклопластика были определены экспериментальным путем на динамическом механическом анализаторе DMA 242 C (NETZSCH). Деформации спиц колеса определены из расчета на статическую прочность, с учетом нюансов предложенной конструкции.

Полученные данные были использованы для расчета внутреннего нагрева спиц колеса при движении на двух скоростях: 5 и 90 км/ч.

Результаты проведенной работы позволяют считать предложенную многоспицевую конструкцию безвоздушной шины вполне работоспособной, обладающей низким тепловыделением и возможностью применения в гражданских и военных транспортных средствах, в целях повышения надежности и снижения инфракрасной заметности.

Ключевые слова: безвоздушная шина, стеклопластик, гистерезисные потери, саморазогрев.

Введение. В последние годы проявляется возрастающий интерес к безвоздушным шинам, главное преимущество которых – устойчивость к проколам и повреждениям. К тому же безвоздушные конструкции превосходят традиционные пневматические шины по характеристикам износостойкости, сопротивления качению веса и т. д. [1–3]. Но у таких шин также имеются и недостатки – невозможность использования конструкции на высоких скоростях движения вследствие повышенного тепловыделения, шума и др. Из-за возникающих недостатков на высоких скоростях известные варианты безвоздушных колес применяются, по сути, только в сфере сельскохозяйственной и военной техники.

Нагрев автомобильной шины формируется в результате гистерезисных потерь в материале, при переменном механическом деформировании конструкции и трении о дорожное полотно. При этом гистерезисные потери составляют 90–95 % общих потерь на сопротивление качению шины [4–6]. Это происходит вследствие наличия внутреннего трения в материале, поглощающего часть энергии деформации, зависящего от свойств используемых материалов и режимов их нагружения [7–8]. Следует отметить, что резиновые материалы пневматических шин обладают низкой теплопроводностью, что приводит к появлению локальных высоконагретых зон внутри шины [9]. Повышенная температура материалов колеса оказывает существенное влияние на его работоспособность, так как снижает механические свойства материалов, создает дополнительное

* Продолжение статьи «Многоспицевая безвоздушная шина из композита: прочность и жесткость» авторов Р.Р. Абдрахимова, В.А. Цитцера, С.Б. Сапожникова (Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». 2016. Т. 16, № 4. С. 5–12).

Расчет и конструирование

термонапряженное состояние и ведет к деградации материала [7]. Использование современных полимерных композитных материалов, обладающих малым внутренним гистерезисным демпфированием, открывает новые возможности применения безвоздушных шин.

Небольшая часть энергии (до 10 %), поглощаемая шиной, расходуется на трение и износ шины в контакте с дорогой (особенно при передаче тяговых и тормозных усилий), аэродинамическое сопротивление, а также на шум [6]. Повышенный шум в конструкциях безвоздушных шин может быть вызван переходом несущих спиц из свободного состояния в нагруженное, сопровождаемым потерей устойчивости [10–12], а также взаимодействием вибрирующих спиц с наружным несущим кольцом колеса и/или контактным взаимодействием между кольцом протектора и землей [12].

Определение температурного состояния шин при работе ведется как экспериментальными, так и расчетными методами. Экспериментально определяют температуру поверхности шин и внутреннего воздуха [13–15]. При этом температура внутренних слоев шины остается неизвестной, либо определяется в отдельных точках, что сопряжено с техническими сложностями. Экспериментальные методы не позволяют построить полную картину теплового состояния шины. Большая часть опубликованных работ посвящена расчетным методам оценки теплового состояния и анализу вязкоупругих свойств материалов, что позволяет достаточно точно оценить нагрев колеса в разных условиях нагружения [16–20].

Данная работа посвящена созданию конструкции колеса, обладающей повышенной надежностью, способного не терять работоспособность при проколе; исследованию процессов преобразования механической энергии деформации в тепло, что является актуальной задачей для гражданского и в особенности военного транспорта для снижения его заметности в инфракрасном диапазоне.

Вязкоупругие характеристики материала. Гистерезисные потери обуславливаются вязкоупругим поведением материала при нагружении [8]. При действии синусоидальной деформации ($\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \sin(\omega t)$) в таких материалах, вследствие потерь энергии ответ образца запаздывает во времени, т. е. наблюдается фазовый сдвиг δ между наложенной деформацией и напряжением. Соответственно, выражение для напряжения выглядит следующим образом:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \sin(\omega t + \delta) = \sigma_0 \cdot \sin(\omega t) \cdot \cos(\delta) + \sigma_0 \cdot \cos(\omega t) \cdot \sin(\delta), \quad (1)$$

где σ – напряжение в момент времени t ; σ_0 – максимальное напряжение; ω – частота колебаний; $\sigma_0 \cdot \cos(\delta)$ – компонента, совпадающая по фазе с наложенной деформацией; $\sigma_0 \cdot \sin(\delta)$ – компонента, находящаяся в противофазе с деформацией.

Соотношение (1) можно представить в виде

$$\sigma = \varepsilon_0 \cdot E' \cdot \sin(\omega t) + \varepsilon_0 \cdot E'' \cdot \cos(\omega t), \quad (2)$$

где ε_0 – максимальная деформация; E' и E'' – модуль накопления и модуль потерь соответственно.

Величины E' и E'' определяют комплексный динамический модуль Юнга E^* материала, который представляется в виде:

$$E^* = E' + i \cdot E'', \quad (3)$$

$$E' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cos(\delta), \quad E'' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \sin(\delta). \quad (4)$$

Мнимую часть E'' называют модулем потерь [7], поскольку она определяет потери энергии, преобразуемой в тепло при механических колебаниях.

Параметр $\operatorname{tg}(\delta)$ характеризует соотношение между вязкой и упругой компонентами комплексного модуля, определяемый из соотношений (4):

$$\operatorname{tg}(\delta) = \frac{E''}{E'} \quad (5)$$

При известных вязкоупругих свойствах материала плотность рассеянной энергии W в единице объема за цикл определяется следующим образом [8]:

$$W = \oint^T \sigma \dot{\varepsilon} dt = \pi \cdot E' \cdot \varepsilon_0^2 \cdot \operatorname{tg}(\delta) = \pi \cdot E'' \cdot \varepsilon_0^2, \quad (6)$$

где T – период колебаний.

Эта рассеянная энергия, определяемая деформацией и модулем потерь, представляет собой площадь петли гистерезиса и вызывает нагрев материала.

Данные характеристики материала определяются экспериментальным путем с помощью динамического механического анализа.

В качестве модельного материала спиц безвоздушного колеса был выбран однонаправленный стеклопластик. Определение вязкоупругих характеристик материала проведено на динамическом механическом анализаторе DMA 242 C (NETZSCH) при следующих параметрах:

- вид испытания: трехточечный изгиб;
- размеры образца $2,15 \times 10,4 \times 20,0$ мм;
- частота воздействия 10 Гц;
- суммарная нагрузка на образец, 11,2 Н: постоянная 7,2 Н, динамическая 4 Н;
- температурный диапазон испытаний 27...70 °С, скорость нагрева 1 °С/мин.

На рис. 1 представлены результаты в виде зависимости вязкоупругих характеристик стеклопластика от температуры.

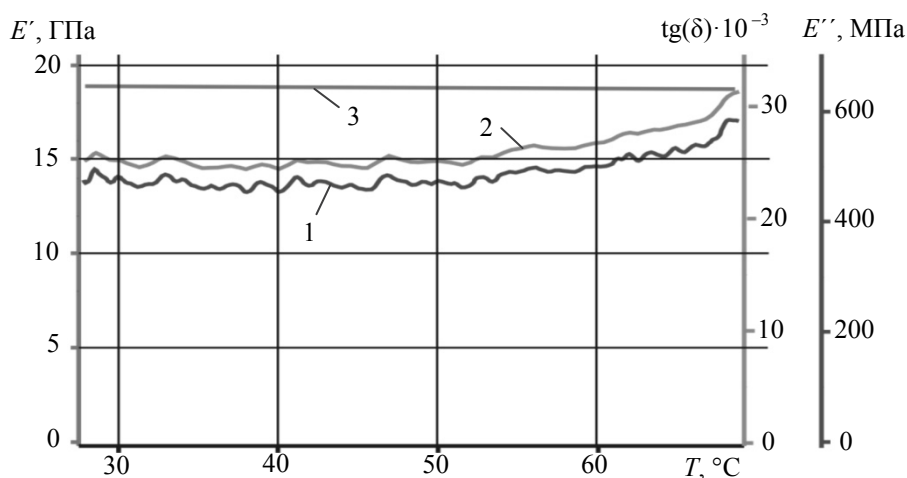


Рис. 1. Зависимость вязкоупругих характеристик стеклопластика от температуры: 1 – E'' , модуль потерь; 2 – $\text{tg}(\delta)$, тангенс угла механических потерь; 3 – E' , модуль накопления

По результатам испытаний модуль потерь E'' принят равным 470 МПа в диапазоне температур 27–55 °С (в следующем разделе приведены результаты расчета, показавшие, что установившаяся температура колеса при максимальной скорости движения не превышает 55 °С, вследствие чего температурная зависимость модуля потерь не учитывалась).

Расчет нагрева колеса. Безвоздушное колесо представляет собой многоспицевую конструкцию, параметры которой определены из соответствия аналогу (пневматической шине) 7,50–20, ГОСТ 5513–97. В качестве материала спиц безвоздушного колеса выбран однонаправленный стеклопластик $E = 50$ ГПа, $\sigma_B = 1000$ МПа, количество спиц $n = 64$. Форма спиц колеса (рис. 2) позволяет получить нелинейную нагрузочную характеристику (аналогично пневматическому колесу) путем взаимодействия спиц между собой при определенном уровне нагрузки. Тем самым обеспечивается необходимое пятно контакта с опорной поверхностью и высокая жесткость при повышенных нагрузках.

Расчет нагрева спиц колеса проведен для двух скоростей движения V : 5 и 90 км/ч. Максимальные деформации спиц колеса определены из расчета на статическую прочность при рабочей вертикальной нагрузке $P_y = 12,5$ кН. Граничные условия в точке A (ось вращения колеса) допускают поворот, вертикальные и продольные перемещения, опора B – контакт колеса с дорогой (см. рис. 2). Наружная часть колеса (радиусом $R = 450$), служащая для восприятия окружных нагрузок, при расчете деформаций была выполнена из гибкого стеклопластика толщиной 1 мм с укладкой волокон по окружности колеса.

В процессе равномерного движения транспортного средства каждая спица колеса испытывает одинаковое циклическое нагружение, поэтому в расчете теплового состояния достаточно рассмотреть одну спицу. Спица была разделена на 10 участков, в каждом из которых были определены деформации и соответствующая мощность внутреннего нагрева по формуле (6) (рис. 3).

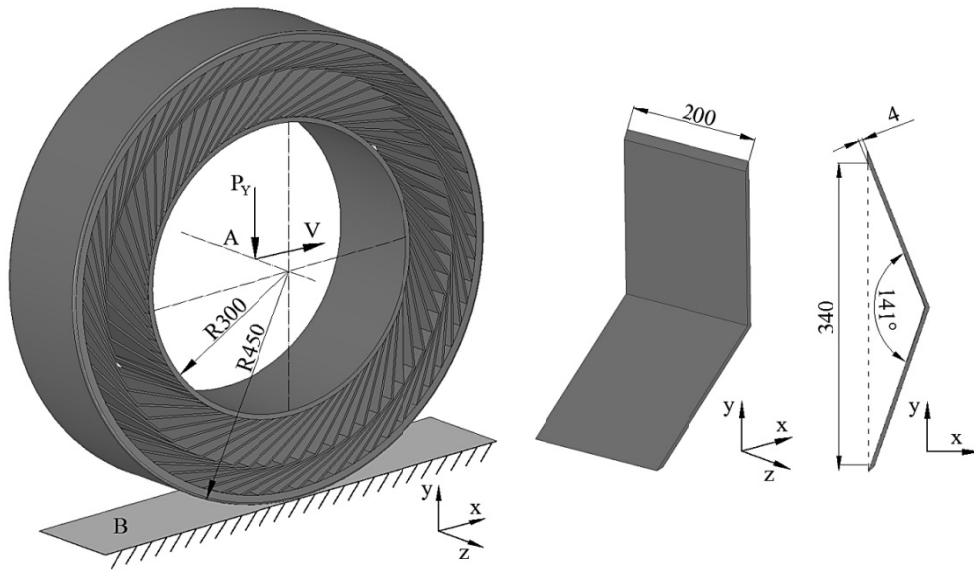


Рис. 2. Конструкция безвоздушного колеса (слева), форма спицы (справа)

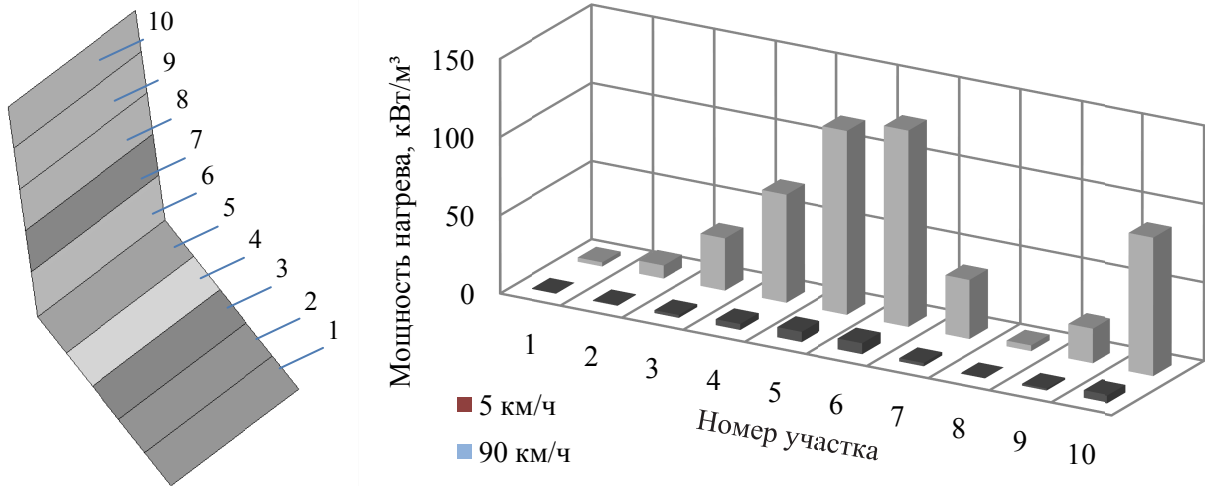


Рис. 3. Распределение мощности источников внутреннего нагрева спиц безвоздушного колеса при скорости движения 5 и 90 км/ч

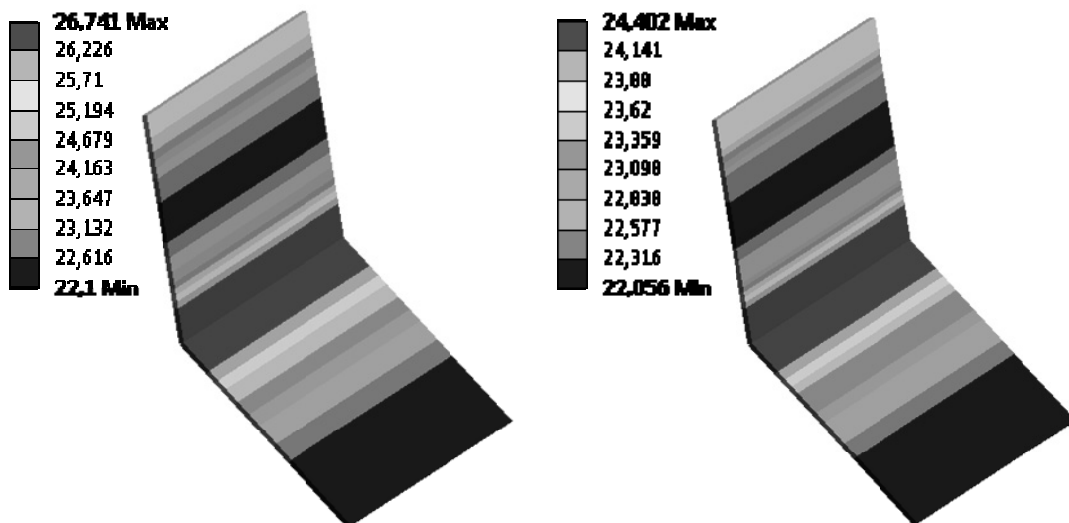


Рис. 4. Температурное поле спицы безвоздушного колеса при скорости движения: слева – 5 км/ч, справа – 90 км/ч

Тепловой расчет проведен для установившегося состояния (модуль *Steady-State Thermal*). Нагрев осуществлялся с помощью заданных мощностей источников тепла (*Internal Heat Generation*), охлаждение – путем конвекции (*Convection*). Коэффициент конвекции был задан: 11,2 и 105,6 Вт/м² [21] с учетом обдува для двух скоростей движения, начальная температура – 22 °С. Результаты расчетов тепловых полей приведены на рис. 4. Они показали, что температура при скорости 90 км/ч возросла на 4,74 °С, при 5 км/ч – на 2,40 °С.

На основе проведенных расчетов можно сделать вывод о том, что нагрев незначительный, что свидетельствует о работоспособности многоспицевого колеса указанной конструкции.

Заключение. В работе представлен анализ установившегося теплового состояния композитных спиц безвоздушного колеса (шины) при движении. Для оценки поглощенной энергии с помощью динамического механического анализа были определены вязкоупругие характеристики стеклопластика, выбранного в качестве модельного материала спиц колеса. Полученные характеристики и определенные методом КЭ деформации были использованы для расчета внутреннего нагрева спиц колеса при движении на двух скоростях 5 и 90 км/ч.

Полученные результаты говорят о работоспособности представленной конструкции, обладающей повышенной надежностью, и возможности применения безвоздушной шины в гражданском и военном транспорте.

Исследование выполнено в Южно-Уральском государственном университете (национальном исследовательском университете) за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-19-00327).

Литература

1. Bras, B. Life-cycle environmental impact of Michelin Tweel® tire for passenger vehicles / B. Bras, A. Cobert // *SAE International Journal of Passenger Cars – Mechanical Systems*. – 2011. – Vol. 4. – № 1. – P. 32–43.
2. Optimisation of geometry and material properties of a non-pneumatic tyre for reducing rolling resistance / M. Veeramurthy, J. Ju, L.L. Thompson, J.D. Summers // *International Journal of Vehicle Design*. – 2014. – Vol. 66. – № 2. – P. 193–216.
3. Rolling resistance of a nonpneumatic tire having a porous elastomer composite shear band / J. Ju, M. Veeramurthy, J.D. Summers, L.L. Thompson // *Tire Science and Technology*. – 2013. – Vol. 41. – № 3. – P. 154–173.
4. Евзович, В.Е. Автомобильные шины, диски и ободья / В.Е. Евзович, П.Г. Райбман. – М.: Автополис-плюс, 2010. – 144 с.
5. Walter, J.D. Energy losses in tires / J.D. Walter, F.S. Conant // *Tire Science and Technology*. – 1974. – Vol. 2. – P. 235–260.
6. Clark, S.K. Rolling resistance of pneumatic tires / S.K. Clark // *Tire Science and Technology*. – 1978. – Vol. 6. – № 3. – P. 163–175.
7. Перепечко И.И. Введение в физику полимеров / И.И. Перепечко. – М.: Химия, 1978. – 312 с.
8. Ward, I.M. Mechanical Properties of Solid Polymers / I.M. Ward, J. Sweeney. – John Wiley & Sons, 2012. – 480 p.
9. Sokolov, S. Analysis of the heat state of pneumatic tires by the finite element method / S. Sokolov // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. – 2009. – Vol. 38. – № 3. – P. 310–314.
10. Bezgam, S. Design and analysis of alternating spoke pair concepts for a non-pneumatic tire with reduced vibration at high speed rolling / S. Bezgam. – Thesis: Clemson University, 2009. – 94 p.
11. Rutherford, W. Use of orthogonal arrays for efficient evaluation of geometric designs for reducing vibration of a non-pneumatic wheel during high-speed rolling / W. Rutherford. – Thesis: Clemson University, 2008. – 133 p.
12. Manga, K.K. Computational method for solving spoke dynamics on high speed rolling Tweel™ / K.K. Manga. – Thesis: Clemson University, 2008. – 106 p.
13. Бабакин, А.Н. Повышение живучести военной автомобильной техники применением современных боестойких автомобильных шин // *Материалы международной научно-технической конференции ААИ «Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров»*. – М.: МГТУ «МАМИ». – 2010. – С. 22–28.

14. Еремин, Г.П. Экспериментальное исследование тепловой нагруженности безопасных колес / Г.П. Еремин, А.Б. Карташов, А.А. Смирнов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. Транспортное и энергетическое машиностроение. – 2015. – Т. 4. – № 661. – С. 49–56.

15. Namjool, M. An experimentally validated FE analysis for transient thermal behavior of the rolling tire / M. Namjool, H. Golbakhshi, H. Momeni-Khabisi // International Journal of Automotive Engineering. – 2016. – Vol. 6. – № 3. – P. 2111–2120.

16. Lin, Y.-J. Temperature prediction of rolling tires by computer simulation / Y.-J. Lin, S.-J. Hwang // Mathematics and Computers in Simulation. – 2014. – Vol. 67. – P. 235–249.

17. Еремин, Г.П. Теоретическая оценка работоспособности перспективных конструкций непневматических шин / Г.П. Еремин, А.Б. Карташов // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2012. – № 10 (10).

18. Deformation and heat generation in a nonpneumatic tire with lattice spokes / S. Yoo, Md S. Uddin, H. Heo et al. // SAE Technical Papers. – 2015. – P. 1–10.

19. Rao, K.N A sensitivity analysis of design attributes and operating conditions on tyre operating temperatures and rolling resistance using finite element analysis / K.N. Rao, R.K. Kumar, P. Bohara // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. – 2006. – Vol. 220. – № 5. – P. 501–517.

20. A finite element algorithm for the prediction of steady-state temperatures of rolling tires / K.V. Narasimha Rao, R. Krishna kumar, P. C. Bohara, R. Mukhopadhyay // Tire Science and Technology. – 2006. – Vol. 34. – № 3. – p. 195–214.

21. Кухлинг, К. Справочник по физике / К. Кухлинг. – 2-е изд. – М.: Мир, 1985. – 520 с.

Абдрахимов Руслан Рамильевич, аспирант кафедры «Техническая механика» аэрокосмического факультета, инженер-исследователь научно-исследовательского центра «Экспериментальная механика», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, ryslan90@gmail.com.

Игнатова Анастасия Валерьевна, инженер Политехнического института, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, ignatovaav@susu.ac.ru.

Сапожников Сергей Борисович, доктор технических наук, профессор кафедры «Техническая механика», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, ssb@susu.ac.ru.

Поступила в редакцию 25 октября 2016 г.

DOI: 10.14529/engin170101

MULTISPOKE AIRLESS COMPOSITE TIRE: THERMAL STATE

R.R. Abdrahimov, ryslan90@gmail.com,

A.V. Ignatova, ignatovaav@susu.ac.ru,

S.B. Sapozhnikov, ssb@susu.ac.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

Analysis of the steady-state thermal composite spokes airless tires is presented in this paper. Heating spokes at high speeds – one of the main disadvantages of airless tire, which occurs due to the presence of internal friction in the material, absorbs some of the energy of deformation. Increased temperature tire material has a significant influence on its performance, as it reduces the mechanical properties of materials, creates an additional thermo-stressed state and leads to degradation of the material. The rational solution to this problem is the use of modern computational methods together with application of composite materials having low internal hysteretic damping.

Dissipated energy of deformation, which is the area of the hysteresis loop is determined by the material viscoelastic properties and deformation under load. Viscoelastic properties, required

to calculate the thermal state of fiberglass, were determined experimentally on a dynamic mechanical analyzer DMA 242 C (NETZSCH). Spoke deformation are determined based on static strength, for a complete model, which taking into account the nuances of the proposed design.

The obtained data were used to calculate the internal heating of the tire spokes while moving at two speeds: 5 and 90 km/h.

The results of this work suggest the proposed workable multispoke construction airless tires, having low self-heating and the possibility of use in civilian and military vehicles, in order to increase reliability and reduce the infrared signature.

Keywords: airless tire, fiberglass, hysteresis loss, self-heating.

References

1. Bras B., Cobert A. Life-Cycle Environmental Impact of Michelin Tweel® Tire for Passenger Vehicles. *SAE International Journal of Passenger Cars – Mechanical Systems*, 2011, vol. 4, № 1, pp. 32–43.
2. Veeramurthy M., Ju J., Thompson L.L., Summers J.D. Optimisation of Geometry and material Properties of a Non-Pneumatic Tyre for Reducing Rolling Resistance. *International Journal of Vehicle Design*, 2014, vol. 66, № 2, pp. 193–216.
3. Ju J., Veeramurthy M., Summers J.D., Thompson L.L. Rolling Resistance of a Nonpneumatic Tire Having a Porous Elastomer Composite Shear Band. *Tire Science and Technology*, 2013, vol. 41, № 3, pp. 154–173.
4. Evzovich V.E. *Avtomobil'nye shiny, diski i obod'ya* [Car Tires, Wheels and Rims]. Moscow, Avtopolis-plyus, 2010. 144 p.
5. Walter J.D., Conant F.S. Energy Losses in Tires. *Tire Science and Technology*, 1974, vol. 2, pp. 235–260.
6. Clark S.K. Rolling Resistance of Pneumatic Tires. *Tire Science and Technology*, 1978, vol. 6, № 3, pp. 163–175.
7. Perepechko I.I. *Vvedenie v fiziku polimerov* [Introduction to Polymer Physics]. Moscow, Khimiya, 1978. 312 p.
8. Ward I.M., Sweeney J. *Mechanical Properties of Solid Polymers*. John Wiley & Sons, 2012. 480 p.
9. Sokolov S. Analysis of the Heat State of Pneumatic Tires By the Finite Element Method. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2009, vol. 38, № 3, pp. 310–314.
10. Bezgam S. Design and Analysis of Alternating Spoke Pair Concepts for a Non-Pneumatic Tire with Reduced Vibration at High Speed Rolling. *Thesis*, Clemson University, 2009, vol. 12, 94 p.
11. Rutherford W. Use of Orthogonal Arrays For Efficient Evaluation of Geometric Designs for Reducing Vibration of a Non-Pneumatic Wheel During High-Speed Rolling. *Thesis*, Clemson University, 2008, vol. 8, 133 p.
12. Manga K.K. Computational Method for Solving Spoke Dynamics on High Speed Rolling Tweel™. *Thesis*, Clemson University, 2008, vol. 5, 106 p.
13. Babakin A.N. [Improving the Survivability of Military Vehicles with the Use of Protected Tires]. *Materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii AAI "Avtomobile- i traktorstroenie v Rossii: priority razvitiya i podgotovka kadrov", MGTU "MAMI"* [Proceedings of the international scientific-technical conference AAI "Automobile and Tractor in Russia: Development Priorities and training", MSTU "MAMI"], 2010, p. 22–28. (in Russ.)
14. Eremin G.P., Kartashov A.B., Smirnov A.A. [Experimental Study of the Thermal Loading of Safe Wheels]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie. Transportnoe i energeticheskoe mashinostroenie*, 2015, vol. 4, № 661, p. 49–56. (in Russ.)
15. Namjoo M., Golbakhshi H., Momeni-Khabisi H. An Experimentally Validated FE Analysis for Transient Thermal Behavior of the Rolling Tire. *International Journal of Automotive Engineering*, 2016, vol. 6, № 3, pp. 2111–2120.
16. Lin Y.-J., Hwang S.-J. Temperature Prediction of Rolling Tires by Computer Simulation. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2014, vol. 67, pp. 235–249.
17. Eremin G.P., Kartashov A.B. *Teoreticheskaya otsenka rabotosposobnosti perspektivnykh konstruktiv nepnevmaticheskikh shin* [Theoretical Estimation of Efficiency Perspective Constructions of Non-Pneumatic Tire]. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii*, 2012, № 10 (10).

Расчет и конструирование

18. Yoo S., Uddin Md S., Heo H., Ju J., D. Kim M., Choi S.-J. Deformation and Heat Generation in a Nonpneumatic Tire with Lattice Spokes. *SAE Technical Papers*, 2015, pp. 1–10.

19. Rao K.N., Kumar R.K., Bohara P. A Sensitivity Analysis of Design Attributes and Operating Conditions on Tyre Operating Temperatures and Rolling Resistance Using Finite Element Analysis. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2006, vol. 220, № 5, p. 501–517.

20. Narasimha Rao K.V., Krishna kumar R., Bohara P.C., Mukhopadhyay R. A Finite Element Algorithm for the Prediction of Steady – State Temperatures of Rolling Tires. *Tire Science and Technology*, 2006, vol. 34, № 3, p. 195–214.

21. Kukhling K. *Spravochnik po fizike* [Handbook of Physics]. Moscow, Mir, 1985. 520 p.

Received 25 October 2016

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Абрахимов, Р.Р. Многоспицевая безвоздушная шина из композита: тепловое состояние / Р.Р. Абрахимов, А.В. Игнатова, С.Б. Сапожников // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2017. – Т. 17, № 1. – С. 5–12. DOI: 10.14529/engin170101

FOR CITATION

Abdrahimov R.R., Ignatova A.V., Sapozhnikov S.B. Multispoke Airless Composite Tire: Thermal State. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2017, vol. 17, no. 1, pp. 5–12. (in Russ.) DOI: 10.14529/engin170101
