

УДК 629.11.012.552.6.001.4

Э.С. Скорняков, Э.Н. Кваша, А.А. Сасов

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ШИН АВТОМОБИЛЕЙ И ТРАКТОРОВ МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Введение. Крупногабаритные и сверхкрупногабаритные шины автомобилей и тракторов – карьерные, строительно-дорожные, сельскохозяйственные и другие относятся к классу внедорожных шин, отличающихся такими особенностями как многослойность, большой вес и высокая единичная стоимость. Это позволяет сделать вывод об актуальности всестороннего подхода, охватывающего прочностные и тепловые расчеты, методы проектирования, технологию изготовления, разработку эксплуатационных режимов, ремонт и восстановление крупногабаритных шин.

Постановка задачи и ее решение. Один из известных вариантов модели представляет силовую конструкцию части шины (каркас, брекер) как изотропную слоистую тороидальную оболочку с переменными геометрическими характеристиками. Учитываются деформации поперечного сдвига слоев.

Контакт между оболочкой и поверхностью абсолютно жесткой дороги осуществляется через протектор.

В качестве альтернативной и более общей модели в работе принята уточненная модель анизотропной многослойной тороидальной оболочки с учетом деформации поперечного сдвига и поперечного обжатия, а также поперечных нормальных напряжений. Эта модель, согласно теории слоистых оболочек, строится на статических гипотезах для поперечных напряжений, касательных и нормальных,

$$\begin{aligned}\sigma_{i3} &= G_{i3}(z) \cdot f_{i,3}(z) \cdot \psi(\alpha_1, \alpha_2), \quad (i=1,2), \\ \sigma_{33} &= q_3 + \frac{h_{m+1}-z}{h} + q_3 - \frac{h_1-z}{h} + \varphi(z) \cdot p(\alpha_1, \alpha_2),\end{aligned}\quad (1)$$

а также на кинематической гипотезе для поперечных деформаций обжатия и приводит к следующим геометрическим соотношениям деформированного состояния

$$u_i(\alpha_1, \alpha_2, z) = v_i(\alpha_1, \alpha_2) - A_i^{-1} z \omega_i + f_1(z) \psi_i - f_3(z) \psi_{3,i}; \quad (2)$$

$$u_3(\alpha_1, \alpha_2, z) = \omega(\alpha_1, \alpha_2) + f_{3,3}(z)\psi_3(\alpha_1, \alpha_2); \quad (i=1,2).$$

Здесь u_1, u_3 - тангенциальные и нормальное перемещения по толщине пакета слоев; v_i, ω - искомые перемещения точек координатной поверхности; ψ_i - искомые функции сдвига; ψ_3 - искомая функция обжатия; $f_i(z)$, $f_3(z)$ - заданные нелинейные функции, описывающие искривление нормали от деформаций сдвига и ее укорочение от обжатия [1].

С помощью смешанного вариационного принципа получена система шести дифференциальных уравнений в частных производных шестнадцатого порядка

$$L_{ij} \cdot V_j + L_{ij} \cdot \psi_j = q; \quad (i, j = 1, 6) \quad (3)$$

и соответствующие краевые условия для шины, жестко закрепленной на ободке

$$\begin{aligned} V_n = 0; \quad V_\tau = 0; \quad \frac{\partial \omega}{\partial n} = 0; \quad w = 0; \\ \psi_n = 0; \quad \psi_\tau = 0; \quad \frac{\partial \psi}{\partial n} = 0; \quad \psi_3 = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Принятая теория позволила не выделять протектор в самостоятельный слой, а включить его непосредственно в число конструктивных слоев оболочки, учитывая его изгибную жесткость в пакете слоев и принимая во внимание поперечное обжатие этого слоя.

В качестве аппарата численной реализации модели НДС принят метод конечных элементов (МКЭ) как альтернатива использованному ранее в задачах расчета НДС КГШ методу локальных вариаций. Применение МКЭ на основе принятой теории многослойных оболочек имеет то существенное преимущество, что требует дискретизации объекта расчета только по его поверхности, существенно сокращая объем вычислений.

Взаимодействие оболочки с поверхностью дороги моделируется системой специальных конечных элементов (КЭ) типа односторонних связей, которые позволяют в процессе расчета при ступенчатом приложении нагрузки определить контактные напряжения (реактивные силы), размеры и форму пятна контакта.

Расчеты произведены на основе вычислительного комплекса "Мираж". Для уточнения моделирования слоистой структуры КГШ в комплексе добавлены специальные функции и определены физико-

механических характеристик слоев в зависимости от характеристик, числа нитей корда, их ориентации, объемных долей волокон и матрицы [2,3].

Расчет произведен для СКГШ 40.00-57 на действие осевой приведенной нагрузки $Q = 620$ кН и внутреннего давления $q = 0,6$ МПа. Рассмотрены два варианта расчетных схем. Вариант 1 составная оболочка - композиция четырех оболочек, моделирующих соответственно каркас, бреккер, подканавку и протектор, объединенных стержнями. Этот вариант рассматривается как модель первого приближения для сопоставления общего деформированного состояния шины с другими вариантами расчета и с экспериментальными данными (рис. 1-2).

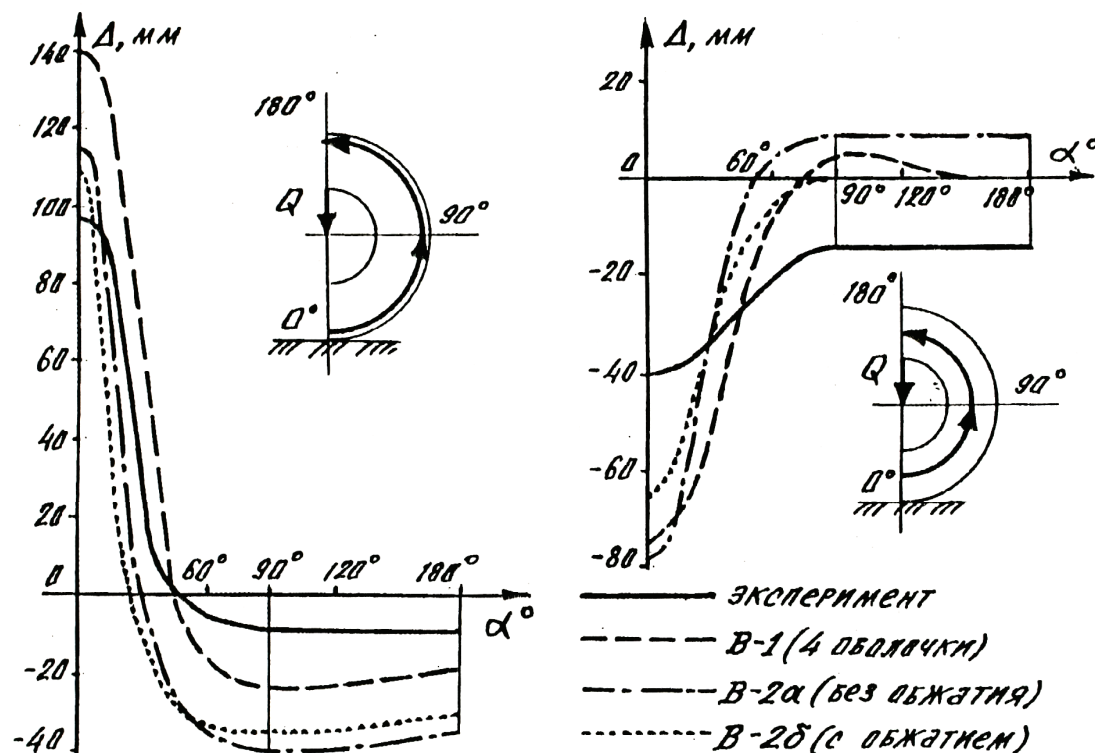


Рисунок 1 – Радиальные перемещения срединной поверхности каркаса: а – по короне; б – по стенке.

Вариант 2 в двух модификациях: 1а – многослойная оболочка с учетом поперечного сдвига и без учета обжатия; 1б – то же, но с учетом обжатия – основной вариант.

Анализ результатов расчета по моделям 1, 2 и сравнение с экспериментальными данными показывает (Рис.1), что максимальные радиальные перемещения серединой поверхности каркаса по короне с

наибольшей точностью моделируются с учетом сдвига и обжатия (16), что подтверждает правильность выбора теории для расчета НДС крупногабаритных шин.

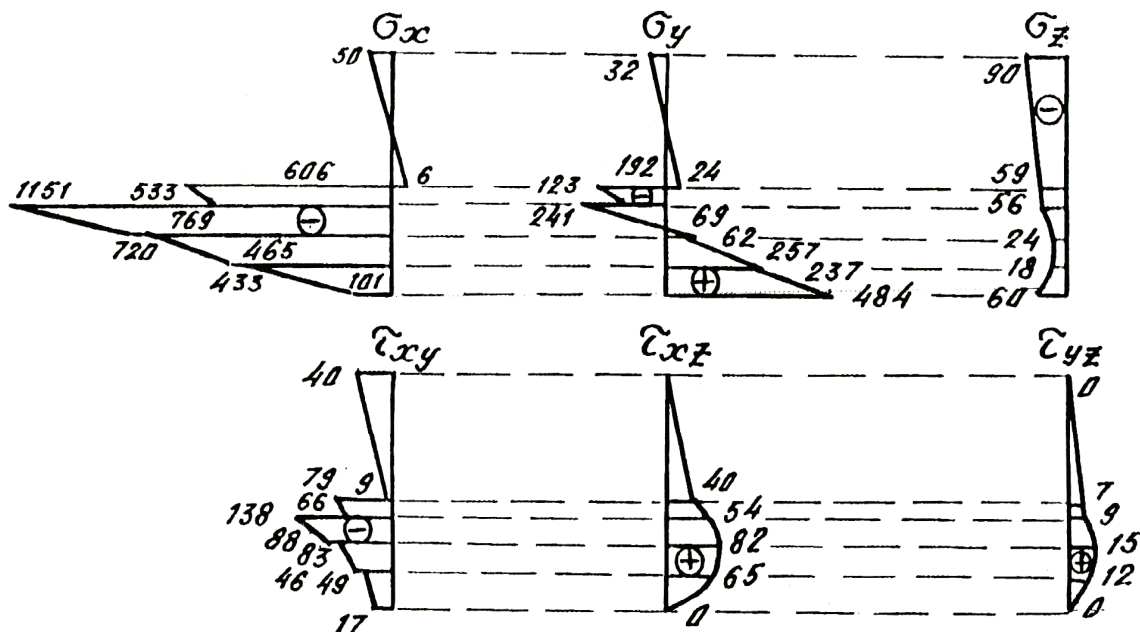


Рисунок 2 – Эпюры напряжений (МПа) по короне в КЭ № 2 нижнего пояса ($\varphi = 0^\circ$)

Для анализа напряженного состояния выделены результаты в трех сечениях-поясах: нижний - $\varphi = 0^\circ$, средний - $\varphi = 90^\circ$, верхний - $\varphi = 180^\circ$. Представлены эпюры компонентов тензора напряжений по толщине шины в трех элементах каждого из поясов (по короне, стенке и ободу). Такие эпюры в нижнем поясе даны на рис.2. В частности отмечено, что наибольшие сжимающие напряжения возникают в каркасе на границе с брекером в нижнем поясе по короне в окружном направлении ($\sigma_x = 11,5$ МПа), а наибольшее растягивающее напряжение - в этом же поясе, но в меридиональном направлении ($\sigma_x = 11,6$ МПа) по ободу на внутренней поверхности шины. Поперечные нормальные напряжения σ_z по толщине шины в зоне контакта с дорогой отвечают характеру прикладываемых нагрузок: 0,6 МПа на внутренней поверхности и 0,9 МПа в пятне контакта, что полностью соответствует значению наибольшего контактного давления, найденного экспериментально. Данные о напряженном состоянии подтверждают предположение о работе протектора на изгиб в среднем и верхнем поясах по короне.

Касательные напряжения кручения τ_{xy} достигают наибольшего значения на внутренней поверхности (8,6 МПа).

Проведены расчеты температурных полей в КГШ. Эти расчеты строятся как решение несвязанной задачи термоупругости с учетом симметрии температурного поля шины в окружном направлении. Материал шины предполагается вязкоупругим, а соотношение между напряжениями и деформациями принимаются согласно модели Кельвина – Фойгта [4].

Для получения численных результатов решение строится методом последовательных приближений - решается упругая задача с определением поля перемещений и деформаций. Далее, учитывая вязкоупругие свойства резины и корда с помощью уравнения теплопроводности, рассчитывают температурные поля; уточняются упругие характеристики и вновь решается упругая задача; находят новое температурное поле. Опыт проведения таких расчетов показал, что достаточно двух приближений. Температурные поля беговой зоны эталонной шины 40.00-57 (нагрузка 620 кН, средняя скорость 15 км/час, температура воздуха 37°C, внутреннее давление 0,6 МПа) даны на рис.3-5 .

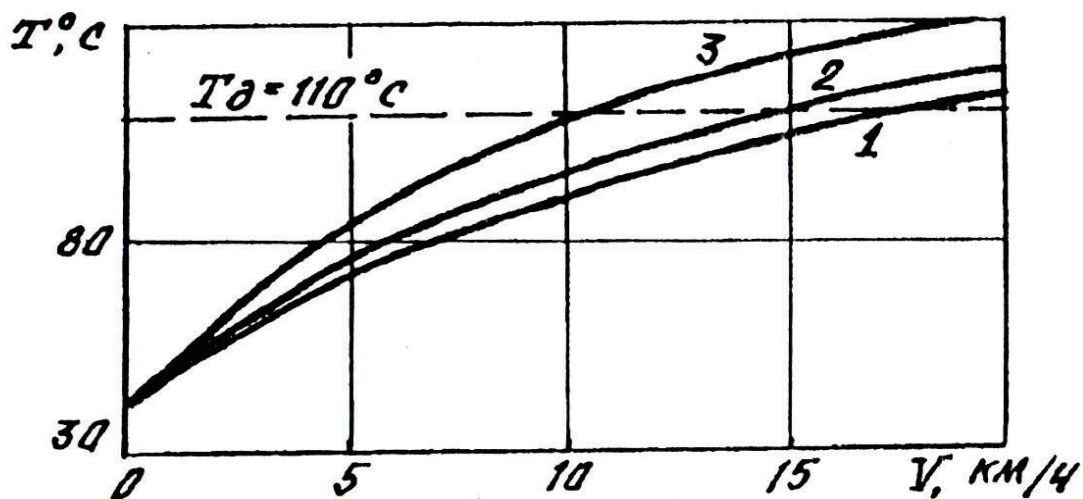


Рисунок 3 – Зависимость максимальной температуры беговой зоны шины 40.00-57 от скорости качения при нагрузках 450(1), 535(2) и 620 кН(3)

С учетом найденного температурного поля устанавливается согласно [5] эксплуатационная производительность шины ТКВЧ. Для эталонной шины ТКВЧ составляет при $t_{\max} = 110^\circ\text{C}$ - 880 ткм/ч, а при $t_{\max} = 120^\circ\text{C}$ - 1100 ткм/ч.

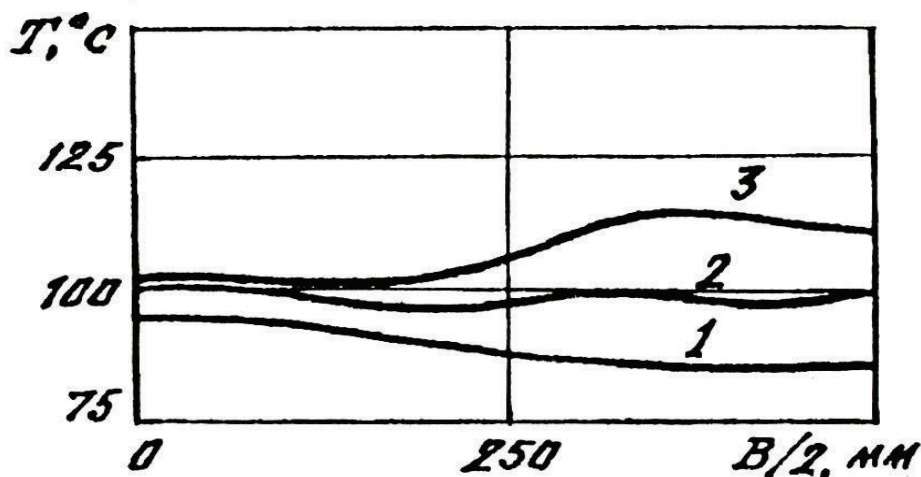


Рисунок 4 – Распределение максимальных температур по ширине (B) беговой зоны шины 40.00-57 при скорости качения 15 км/ч и нагрузках на шину 450(1), 535(2) и 620 кН(3).

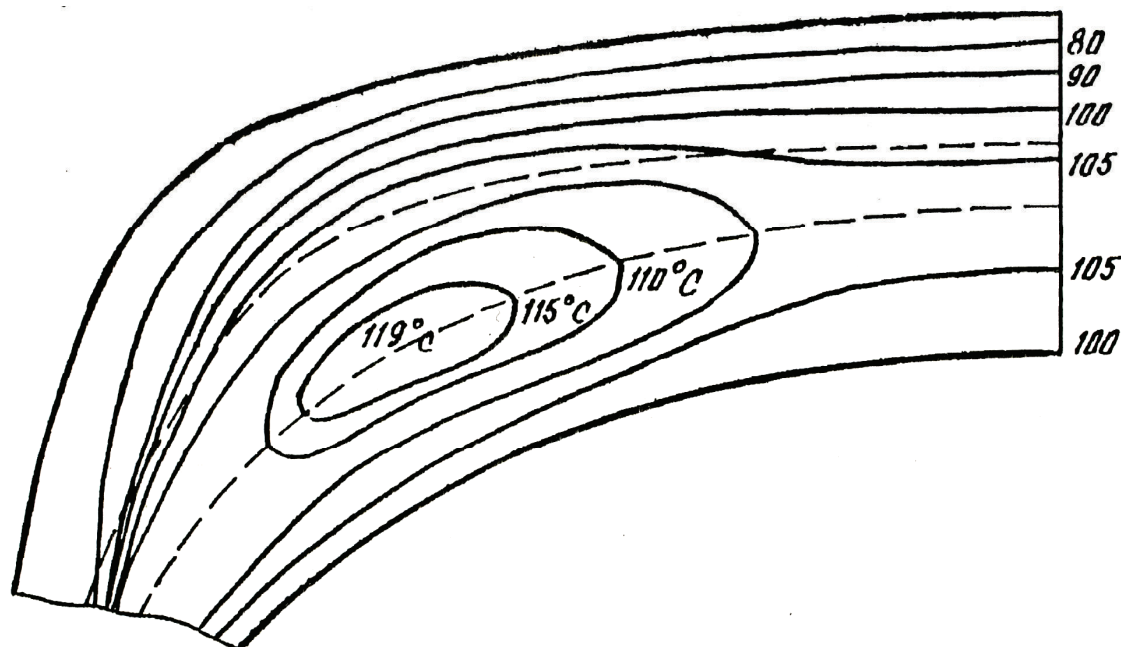


Рисунок 5 – Температурное поле беговой зоны шины 40.00-57; $Q=620$ кН; $V=15$ км/ч; $t_c=37$ °С; $q=0.6$ МПа (пунктир - границы каркаса и подканавки)

Выводы. Изучено влияние конструктивных параметров и режимов эксплуатации на сопротивление качению КГШ. Это влияние связано с потерями энергии на качение шин, которые вычисляются как потери тепловой энергии на единице пути.

Установлено, что основной вклад в сопротивление качению приходится на беговую дорожку. При этом вклад каркаса в

сопротивление возрастает с уменьшением модуля упругости корда и превышает суммарные потери на деформирование покровных резин.

В дополнение к численным методам расчета описан подход, основанный на применении теории моделирования физических и тепловых процессов, происходящих в крупногабаритных шинах [6,7]. В отличие от аналитических и численных методов, являющихся прямыми методами расчета, метод моделирования представляет собой косвенный метод. Для его применения необходимо первоначально иметь надежные результаты расчета одного или нескольких объектов, называемых далее "моделью". Для получения этих результатов применяется один из прямых методов расчета либо проводятся физические эксперименты. Затем косвенным путем, то есть путем пересчета, без прямых вычислений могут быть получены исчерпывающие данные о напряженно-деформированном и тепловом состоянии шины, конструкция которой отличается от "модели". Чтобы отличать объект расчета от уже имеющегося его прототипа, будем далее его называть натурным объектом или, сокращенно, "натурой".

ЛИТЕРАТУРА

1. Скорняков Э.С., Кваша Э.Н., Плеханов А.В. Расчет ресурса сверхкрупногабаритных шин // Тр. II Всесоюзн. Симпозиума / Проблемы шин и резинокордных композитов. – М.: НИИШП, 1990. – С.3-7.
2. Рассказов А.О., Соколовская И.И., Шульга Н.А. Теория и расчет слоистых ортотропных пластин и оболочек. – Киев: Вища школа, 1986. – 191 с.
3. Рассказов А.О. Расчет многослойной ортотропной полой оболочки методом конечных элементов // Прикл. механика. – 1978. – 14, Т8. – С. 51-56.
4. Скорняков Э.С., Кваша Э.Н., Хоменя А.А., Бойков В.П. Эксплуатация и ремонт крупногабаритных шин. – М.: Химия, 1991. – 128 с.
5. Скорняков Э.С., Завьялов Ю.П. и др. Малооперационный метод местного ремонта шин // Промышленность синтетического каучука, шин и резиновых технических изделий. – 1987. – С. 27-31.
6. Скорняков Э.С. Моделирование теплового и напряженно-деформированного состояния геометрически и физически подобных шин // Межд. научно-техн. конф. «Эластомеры». Тез. докл.-Рига, 1992. – С. 146-148.
7. Скорняков Э.С. Теория моделирования сверхкрупногабаритных шин. – Днепропетровск: ДГУ, 1992. – 32 с.

Получено __.__.2006 г.