

МОДЕЛИРОВАНИЕ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ШИН С УЧЕТОМ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

Е л е н а П О Г А С И Й

Приднепровская Государственная Академия Строительства и Архитектуры,

Т а т ь я н а Ч У П И Л К О

Университет Таможенного Дела и Финансов

Крупногабаритные шины, как известно, имеют многослойный каркас и массивный протектор. Во время эксплуатации происходит их разогрев до температуры 110°С, что приводит к проявлению вязких свойств резинокордных материалов. Обычно поведение шинных материалов описывается обобщенным законом Гука без учета вязких эффектов и влияния температуры на конструкцию и изменение свойств материалов [1, 2].

Шина моделируется трехслойной анизотропной оболочкой в соответствии с конструктивными особенностями на основе гипотезы ломаной линии для каркаса. Оболочка нагружена внутренним давлением интенсивности q [3]. Независимыми являются перемещения внешних слоев. Перемещения среднего слоя вычисляются через перемещения внешних слоев и изменения кривизны во время деформации.

Задача решается в геометрически нелинейной постановке. Учитываются поперечные деформации сдвига. Геометрические соотношения приняты в соответствии с [4]. Поведение резинокордного материала описывается нелинейной моделью наследственного типа с учетом температуры [5]

$$\Psi(\sigma) = \varepsilon(t) - \int_0^t K(t-\tau) \varepsilon(\tau) T^\gamma(t) d\tau, \quad (1)$$

ядро релаксации выбираем в виде ядра Абеля:

$$K(t-\tau) = \frac{k}{(t-\tau)^\alpha}; \quad 0 < \alpha < 1,$$

где $\Psi(\sigma)$ кривая мгновенного деформирования; α, k, γ параметры, подлежащие определению; $T(t)$ —температура на момент времени t .

В модели (1) использован общий принцип поведения материала – принцип наследственности. В условиях разных режимов нагружения и температур для полного описания поведения материала необходимо знание трех параметров: k, α, γ . В [6] было показано, что кривая мгновенного деформирования и параметры, определенные при

условии одного режима нагружения, могут использоваться в расчетах при других режимах, а также для прогнозирования поведения материала в других условиях.

Для определения параметров k, α и вида зависимости между напряжениями и деформациями были проведены серии испытаний на одноосное растяжение при скоростях $V_1 = 5 \text{ мм/мин}$ и $V_2 = 200 \text{ мм/мин}$. Были использованы образцы, вырезанные в окружном и меридиональном направлениях шины для учета анизотропии материала.

В соответствии с методикой [6] найдены параметры k, α по экспериментальным кривым деформирования образцов, вырезанных в окружном направлении, когда V_1 и V_2 : $k = 0,023, \alpha = 0,97$. Эти же параметры использовали при расчете диаграмм деформирования образцов, вырезанных в меридиональном направлении. В обоих случаях построены кривые мгновенного деформирования $\Psi(\sigma)$. При сравнении расчетных и экспериментальных данных (кривые 1, 2, 1' Рис.1) выявлено, что те же самые параметры k, α одинаково хорошо описывают диаграммы деформирования.

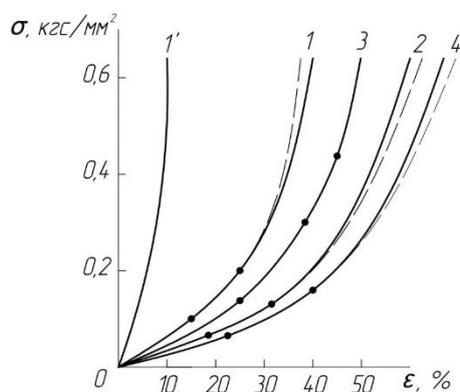


Рис.1. Кривая мгновенного деформирования (1') и диаграммы деформирования резинокорда в меридиональном направлении шины при условии

$$V = 200 \text{ (1, 2, 3); } 5 \frac{\text{мм}}{\text{мин}} \text{ (2); } T = 20 \text{ (1, 2); } 70 \text{ (3); } 120 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ (4)}$$

(сплошная линия – эксперимент, пунктирная – расчет).

Экспериментально было доказано, что для анализа сложнапряженного состояния исследованных материалов нет необходимости определять набор ядер наследственности, связанных с анизотропией. Достаточно одного ядра, параметры которого определяются из испытаний на образцах, вырезанных в произвольном направлении. Отличаются только кривые мгновенного деформирования, знание которых отвечает знанию матрицы упругих модулей анизотропного материала для линейно-наследственной среды. Поэтому можно принять, что параметры ядра наследственности не зависят от направления вырезания образцов.

Для образцов, вырезанных в окружном направлении, использовалась методика [5]. По экспериментальным диаграммам деформирования при $T=20^\circ$ и 120°C определяли температурный параметр $\gamma = 0,55$ Его использовали для прогнозирования поведения материала при $T = 70^\circ\text{C}$.

Эксперимент и расчет хорошо совпадают. Найденные значения использовали также в расчетах диаграмм деформирования образцов, вырезанных в меридиональном направлении при $T = 20, 70, 120^\circ\text{C}$.

Проведенные расчеты и эксперименты на ползучесть подтвердили возможность принятия определенных раньше параметров на другие виды нагружения (Рис.2).

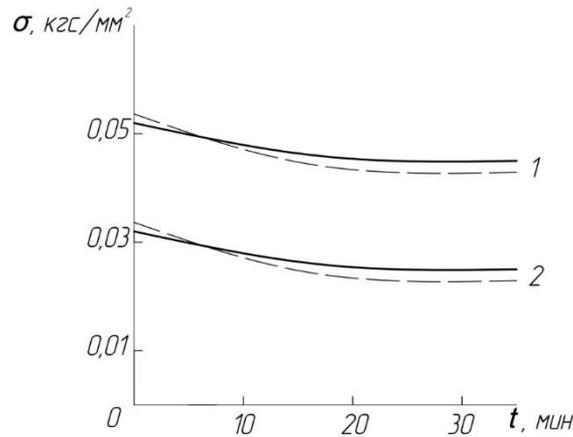


Рис.2. Кривые релаксации напряжений резинокорда в меридиональном направлении шины при условии $\varepsilon = 10\%$ (1) и 5% (2) (сплошная линия – эксперимент, пунктирная – расчет).

Исследование свойств материалов шин и возможность прогнозирования их поведения при разных условиях нагружения проводили в рамках возможностей экспериментального оборудования. Уровни деформаций составляли 50%, напряжений – 1,5 кгс/мм/мм. При таких условиях проявлялась существенная физическая нелинейность. Для шины, нагруженной внутренним давлением, при температуре эксплуатации уровни допустимых деформаций составляют 12...15%. При таких уровнях лучше пользоваться более удобной линейной моделью среды. Погрешности в таком случае не превышают 15%.

Для линейной наследственности $\Psi(\sigma) = \frac{\sigma}{E}$ уравнение (1) для одноосного напряженного состояния принимает вид

$$\sigma(t) = E\varepsilon(t) - E \int_0^t K(t - \tau) \varepsilon(\tau) T^\gamma(t) d\tau. \quad (2)$$

Для анизотропного случая при сложнонапряженном состоянии

$$\sigma_{ij}(t) = E_{ijk\epsilon} \varepsilon_{k\epsilon}(t) - E_{ijk\epsilon} \int_0^t K(t - \tau) \varepsilon_{k\epsilon}(\tau) T^\gamma(t) d\tau. \quad (3)$$

Используется энергетический способ решения задачи численным методом локальных вариаций, который легко алгоритмируется и безразличен к типу нелинейности [7]. При этом реализуется принцип минимума полной энергии для действительного состояния системы. По найденным перемещениям определяют деформации и перемещения в каркасе шины.

Полная энергия оболочки в момент времени t , учитывая наследственность закона изменения напряжений, равна

$$\begin{aligned} \Xi(t) = \int_V \left[\frac{1}{2} E_{ijk\epsilon} \varepsilon_{ij}(t) \varepsilon_{k\epsilon}(t) - E_{ijk\epsilon} \varepsilon_{k\epsilon}(t) \int_0^t K(t-\tau) \varepsilon_{k\epsilon}(\tau) T^Y(t) d\tau \right] dV \\ - \int_S q_i U_i(t) dS \\ (i, j, k = 1, 2, 3) \quad (4) \end{aligned}$$

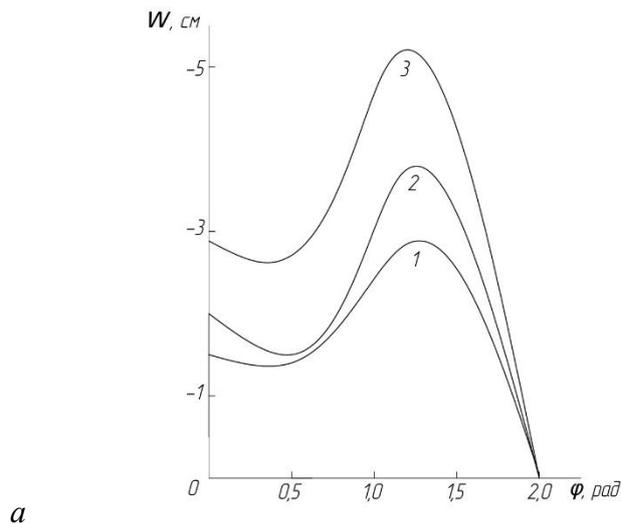
Коэффициенты упругости в (4) были определены по теории армирования [8]. Значения перемещений варьируются только на момент времени t , история их изменений определяет состояние материалов на данный момент.

Предположим, что распределение температур в шине постоянно [9]. Решаем задачу пошаговым методом. Упругие деформации определяем на первом шаге решения. На каждом последующем используем деформации, полученные на всех предыдущих шагах.

При расчете термонапряженного состояния каркаса крупногабаритной шины 40.00-57, находящейся под действием внутреннего давления, в холодной шине установлено давление $q_0 = -600$ кПа, в разогретой $q_t = -750$ кПа. Близкое к постоянному поле перемещений и деформаций наблюдается через 100 минут от начала деформирования.

На Рис.3а показано перемещение точек меридионального сечения каркаса в радиальном направлении (прогиб шины) при условии упругого и вязкоупругого деформирования «холодной» шины. В разогретой шине эти показатели на 25...30% выше. Повышенные температуры обуславливают дополнительное увеличение перемещений в меридиональном направлении.

Межслойные сдвиговые деформации в условиях вязкоупругого деформирования разогретой шины, приведенные на Рис.3б, на 50% отличаются от вязкоупругих деформаций в «холодной» шине, которые в свою очередь превышают упругие деформации примерно в два раза, упругие деформации примерно в два раза.



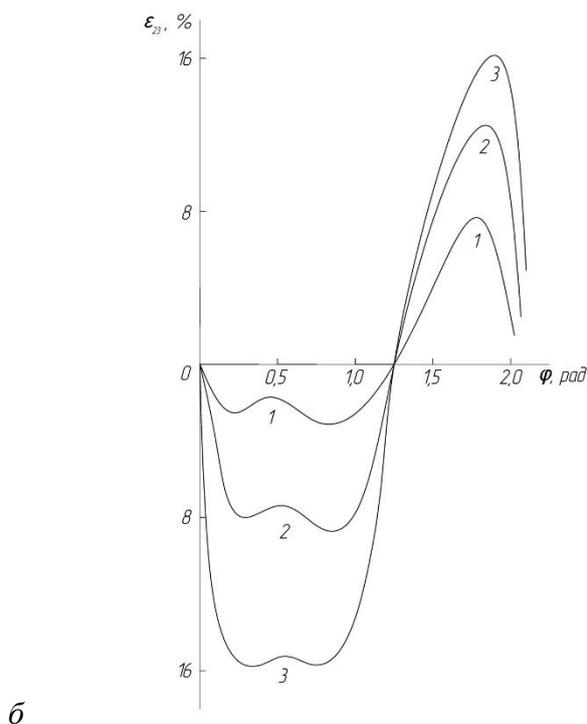


Рис.3. Прогибы каркаса (а) и межслойные деформации сдвига (б) в меридиональном сечении (от короны до обода) при условии упругого деформирования ($q_0 = -600$ кПа) (1); при условии вязкоупругого деформирования «холодной» ($q_0 = -600$ кПа, $t=100$ мин) (2) и вязкоупругого деформирования разогретой шины ($q_t = -750$ кПа, $t=100$ мин) (3).

Максимальное значение сдвиговых вязкоупругих деформаций в условиях эксплуатационных температур составляет примерно 15%, что объясняется необходимостью их учета при расчете напряженно-деформированного состояния крупногабаритных шин.

Аналогичные графики можно построить для всех компонент деформаций, напряжений и перемещений во всех слоях трехслойной модели каркаса, которые определяются при решении задачи. Отметим, что при условии постоянного поля деформаций и перемещений наблюдается постепенное снижение уровня напряжений, что согласуется с теорией наследственной упругости и отвечает экспериментальным наблюдениям.

Из анализа полученных результатов следует, что вязкоупругие эффекты при деформировании шины в условиях ее разогрева выявляют существенное влияние на поля перемещений, деформаций и напряжений. Пренебрежение этими эффектами при расчетах может привести к существенным ошибкам в оценке трудоспособности шины, а также при создании и проектировании новых конструкций.

Литература

- [1] Бухин Б.Л. Введение в механику пневматических шин. – М.:Химия, 1988. – 222 с.
- [2] Григолюк Э.И., Куликов Г.М. Многослойные армированные оболочки. Расчет пневматических шин. – М.: Машиностроение, 1988. – 287 с.
- [3] Кваша Э.Н. Расчет линейных и угловых параметров жесткости шины при обжатии на цилиндрическую поверхность // Научные основы и пути создания шин и технология их производства уровня 2000 г. // Материалы научн.-техн. конференции. – Москва, 1988.- Т.4.1, с.60-66.
- [4] Новожилов В.В. Теория упругости. Л.:Судпромгиз, 1958. -370 с.
- [5] Суворова Ю.В. Учет температуры в наследственной теории упруго-пластических Сред // Проблемы прочности, 1977. – і 2, с 43-48.
- [6] Осокин А.Е., Суворова Ю.В. Нелинейное определяющее уравнение наследственной среды и методика определения его параметров // Прикладная математика и механика, 1978. - Вып. 6, с.1107-1114.
- [7] Черноусько Ф.Л., Баничук Н.В. Вариационные задачи механики управления. – М.:Наука, 1973.- 238 с.
- [8] Малмейстер А.К., Тамуж В.П., Тетерс Г.А. Соппротивление жестких полимерных материалов. -Рига: Зинатне, 1972. – 498 с.
- [9] Индейкин Б.А., Ищенко В.А., Кваша Э.Н., Никитина Л.Б. Влияние конструктивных параметров на термонапряженное состояние сверхкрупногабаритных шин // Каучук и резина, 1986. – с.6-16.

MODELLING OF LARGE-SIZED TIRES WITH ACCOUNT FOR THE REOLOGICAL CHARACTERISTICS OF MATERIALS

E l e n a P O H A S I I, T a t y a n a C H U P I L K O

To calculate the stress-strain state of large-sized tires, a hereditary type model based on experimental data is proposed, which allows describing and predicting the behavior of rubber-cord composites at various loading regimes and different temperature levels.

Calculated curves and analysis of viscoelastic deformations and displacement fields of the 40.00-57 tire loaded with internal pressure at a temperature field appearing in the tire during while in operation. Analysis of the results shows a significant effect of the viscosity of rubber materials and temperature on the stress-strain state of a large-sized tire.