

УПРУГИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И МЕХАНИКА ДЕФОРМИРОВАНИЯ ТЕКСТИЛЬНЫХ КОРДОВ

А.А. Каспаров

Государственный НИИ крупногабаритных шин, г. Днепродзержинск

Пневматическая шина - торондальная оболочечная конструкция, стенки которой в общем случае состоят из разных изотропных резиновых и различных анизотропных резинокордных слоев, что делает решение задачи расчета ее напряженно-деформированного состояния (н.д.с.) предельно тяжелым, а, стало быть, и задачи проектирования шины с наилучшим (оптимальным) балансом свойств.

Основные трудности, возникающие при исследовании н.д.с. шины, заключены, с одной стороны, в проблеме измерения упругих свойств материалов, применяемых в ней, главным образом текстильных и металлических кордов из-за их анизотропности, а также резин из-за их нелинейности. С другой стороны, трудности обусловлены проблемой получения удобных и достаточно точных математических выражений для описания упругих характеристик и законов деформирования слоистых (составных) резинокордных (композитных) стенок шины. Поэтому по сей день конструирование шин в большинстве случаев осуществляется независимо от рецептуры резиновых смесей и технологии производства кордов, от которых зависят их упругие свойства. Такое положение, по-видимому, объясняется тем, что конструкторам шин хорошо известны, по крайней мере, качественные функции кордных и резиновых компонентов. Резина, обладающая высоким удлинением, выполняет функцию оболочки, содержащей и удерживающей воздух, обеспечивает сопротивление износу, а также сцепление с поверхностью дороги. Корд, обладающий низким удлинением, служит арматурой резины и воспринимает большую часть нагрузок, действующих на шину во время ее эксплуатации. Однако для оптимизации параметров шины на стадии проектирования, а также осуществления прогноза ее н.д.с. и усталостной прочности, необходимо знать еще упругие свойства резин, кордов и составленных из них резинокордных стенок шины.

В настоящей работе предполагается заполнить пробел в исследованиях механики работы шинных текстильных кордов.

Целью исследований ставилось: по данным измерений описать с высокой степенью точности механику деформирования и упругие свойства шинных текстильных кордов.

Каркас крупногабаритной шины в большинстве случаев собирается из довольно большого числа слоев резинокордного полотна. Резинокордное же полотно изготавливается из регулярной системы прочных однопроволочных текстильных нитей, называемых иначе кордом, путем наложения с двух сторон тонких резиновых слоев и пропускания этого трехслойного пакета через каландр. Исходная необработанная текстильная нить называется суровой нитью или суровым кордом. Полотно, собранное из суровых нитей с помощью непрочного поперечного утка, называется суровьем.

При определении упругих свойств текстильной нити шинного корда необходимо быть предельно осторожным. Дело в том, что кроме высокой точности, требуемой при определении деформаций, вызванных малыми нагрузками, необходимо учитывать как специфические особенности конструкции текстильной нити, так и свойства текстильного материала, из которого изготовлена нить.

Действительно, текстильная нить, употребляемая в шинном производстве, представляет собой сложную конструкцию, состоящую из множества элементарных волокон (филаментов), скрученных в отдельные пряди (стренги), две или три из которых затем скручены для равновесия в обратном направлении. Из-за такой конструкции нить корда имеет, с одной стороны, некоторое количество пустот между отдельными филаментами и стренгами, а с другой стороны, имеет форму поперечного сечения, несколько отличную от круговой.

В процессе производства суровье подвергается пропитке специальным составом для повышения его адгезии с резиной, сушке, термовытяжке и каландрованию с резиновыми слоями. При этом получается прорезиненное полотно в виде длинного листа (см. рис. 1), имеющего ряд параллельно расположенных нитей корда, у которых пустоты уже заполнены пропиточным составом и резиновой смесью, а сами нити корда изолированы друг от друга резиной, что предохраняет их от перетираания.

Что касается свойств текстильных материалов, из которых изготавливаются нити корда, то, например вискоза, весьма чувствительна к влажности. Ее упругие характеристики в значительной мере зависят от влажности. Но исследования показывают, что нити вискозного корда в готовых шинах находятся практически в сухом состоянии. Следовательно, нити корда из вискозы должны испытываться на разрывных машинах именно в таких же условиях, то есть сухими. С другой стороны, капрон (полиамид) практически не чувствителен к влажности, но после начального удлинения под действием приложенной нагрузки, его деформирование будет продолжаться еще в течение длительного времени. Исследования с капроновым кордом в каркасе шин показали, что при их поддутии интервал времени между стандартными замерами габаритных размеров должен составлять не менее 24 часов. Поэтому перед испытанием на разрывных машинах полиамидные нити корда необходимо подвергать специальному механическому кондиционированию.

Из-за указанных особенностей конструкции и материалов текстильных кордов, их упругие свойства от состояния суровья до конечного состояния в готовом изделии существенно изменяются. Эти изменения заметны после каждого такого передела, как пропитка, сушка и термовытяжка нитей корда, каландрование пропитанной кордной ткани, формование и вулканизация изделия. Поэтому упругие свойства текстильного корда следует определять на его нитях, извлеченных из готовых изделий.

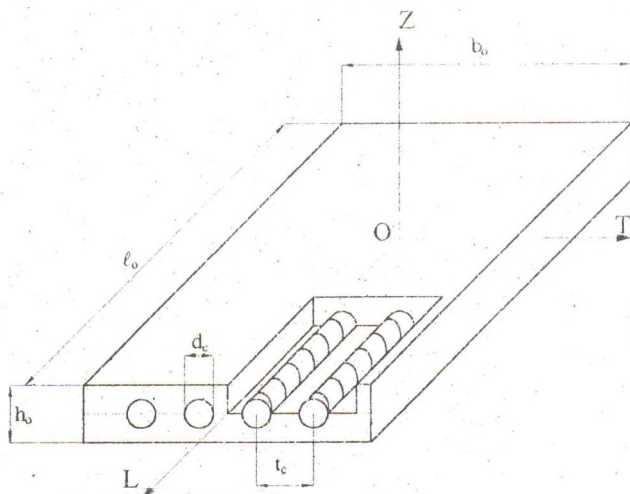


Рис. 1. Схема листа резинокордного полотна, состоящего из ряда параллельных текстильных нитей в резине.

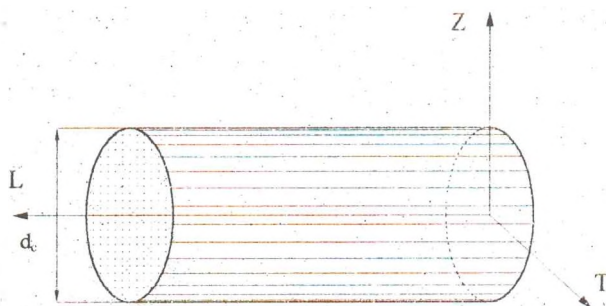


Рис. 2. Идеализированный текстильный шинный корд.

С другой стороны, в силу конструктивных особенностей текстильную нить корда нельзя рассматривать как однородный изотропный материал подобно резине. Ее можно с достаточной степенью точности для инженерной практики рассматривать как квазиоднородный трансропный (то есть изотропный в поперечном оси L направлении) материал в границах цилиндра, занятого нитью (см. [1] и рис. 2), который характеризуется пятью независимыми константами упругости:

E_{cL}, E_{cT} - модулями упругости нити корда по направлениям осей L и T соответственно (то есть продольным и поперечным модулями упругости корда);

ν_{cLT}, ν_{cTL} - главным и побочным коэффициентами Пуассона, характеризующими поперечное сокращение при растяжении в направлениях осей координат (второй индекс у коэффициента Пуассона ν показывает направление действия силы, третий индекс - направление сокращения);

G_{cLT} - модулем сдвига, характеризующим тангенциальное напряжение, необходимое для пропорционального изменения угла между направлениями L и T .

Для определения продольного модуля упругости E_{cL} нитей корда 23КНТС, извлеченных из новой шины 24/50-22.5, проводились испытания на растяжение образцов. Перед испытанием образцы нитей корда 23КНТС подвергались механическому кондиционированию, заключающемуся в том, что они предварительно растягивались усилием $N = 10 \text{ Н}$, а затем получали отдых в течение 24 часов. Для сопоставимости результатов опыта, испытания всех образцов проводились с постоянной скоростью деформирования $V = 50 \text{ мм/мин}$ при температуре окружающей среды $T = (20 \pm 2)^\circ \text{С}$. Рабочая длина образца ℓ равнялась 250 мм, а количество испытанных образцов m было равно 5. Испытания образцов нитей корда проводились на малоинерционной разрывной машине ZT - 40.

В результате опытов были получены диаграммы растяжения, представляющие собой графические зависимости растягивающего усилия N_c от приращения длины образца $\Delta \ell$:

$$N_c = N_c(\Delta \ell). \quad (1)$$

Опыты проводились на участке сравнительно небольших усилий ($0 \leq N_c \leq 18 \text{ Н}$), которые реально могут возникать в корде при надувке шины до рабочего внутреннего давления.

Поскольку усилия в полученных диаграммах зависят еще и от длины образца ℓ , то пользоваться этими диаграммами неудобно. Поэтому опытные диаграммы (1) перестраивались в графики зависимостей вида

$$N_c = N_c(\varepsilon_1), \quad (2)$$

где $\varepsilon_1 = \Delta \ell / \ell$ - продольная относительная деформация нити.

На рис.3 кривой изображена одна из таких перестроенных диаграмм. Из этой диаграммы видно, что зависимость усилия от продольной относительной деформации нелинейная, но с достаточной для инженерной практики степенью точности ее можно аппроксимировать прямой линией:

$$N_c = C_{cl} \cdot \varepsilon_1. \quad (3)$$

Здесь коэффициент пропорциональности C_{cl} характеризует продольную жесткость корда на растяжение.

Далее ставилась задача нахождения продольной жесткости корда C_{cl} путем аппроксимации измеренной зависимости (2) расчетной линейной зависимостью (3) методом наименьших квадратов [2]. Оценка тесноты линейной связи величин ε_1 и N_c делалась согласно [3,4]. После определения таким способом продольной жесткости C_{cl} без труда определяется продольный модуль упругости E_{cl} по формуле:

$$E_{cl} = \frac{C_{cl}}{F_c} = \frac{4C_{cl}}{\pi d_c^2}, \quad (4)$$

где F_c - площадь поперечного сечения нити; d_c - диаметр нити. В таблице 1 даны значения продольных жесткостей, выборочных коэффициентов корреляции и продольных модулей упругости для 5-ти образцов корда 23КНТС.

Таблица 1. Значения продольных жесткостей $C_{cl(j)}$, коэффициентов корреляции $r_{(j)}(\varepsilon_1, N_c)$ и модулей упругости $E_{cl(j)}$ для растягиваемых нитей корда 23КНТС ($j \leq m = 5$).

j	1	2	3	4	5
$C_{cl(j)}, \text{ Н}$	461,028	470,670	500,825	506,825	506,407
$r_{(j)}(\varepsilon_1, N_c)$	0,9988	0,9935	0,9975	0,9981	0,9972
$E_{cl(j)}, \text{ МПа}$	1197,96	1223,01	1301,37	1315,87	1390,87

Из табл.1 видно, что выборочные коэффициенты корреляции $r_{(j)}(\varepsilon_1, N_c)$ для каждого j-го случая (j-ой нити корда) мало отличаются от единицы. Поэтому линейное уравнение регрессии (3) весьма точно воспроизводит измеренные связи $N_c = N_c(\varepsilon_1)$ между усилиями и относительными линейными деформациями в нитях корда 23КНТС. Это хорошо видно из

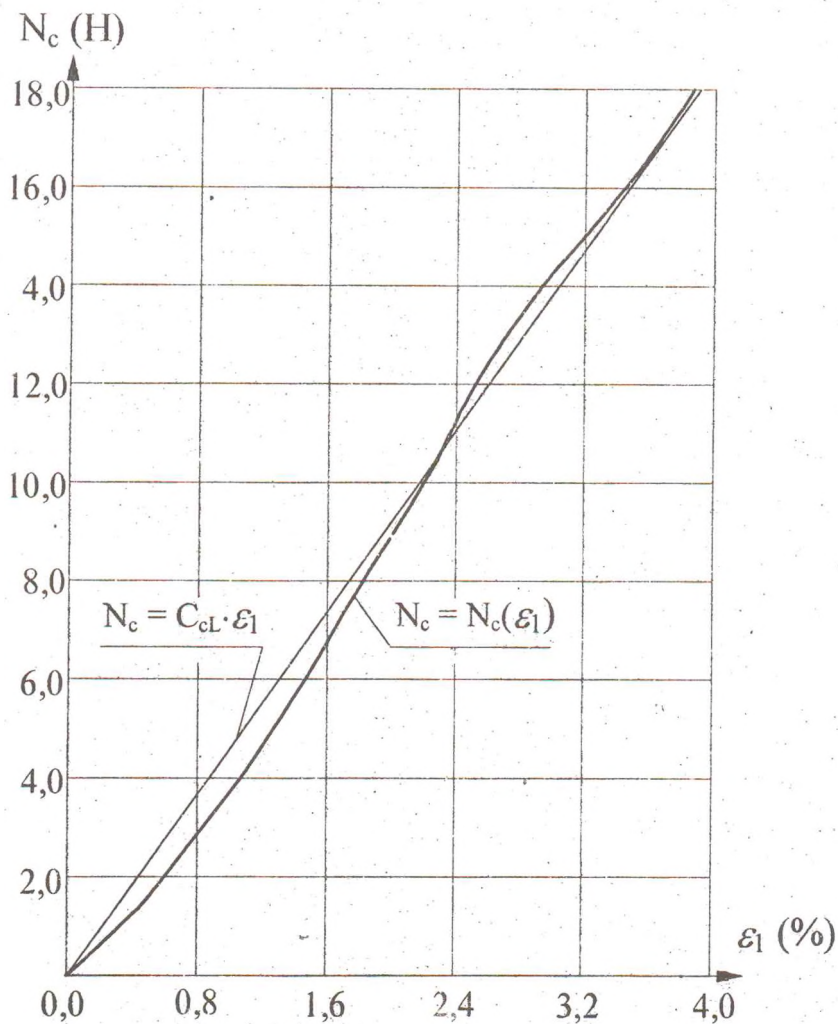


Рис. 3. Диаграмма растяжения корда 23КНТС, извлеченного из новой шины 24/50-22,5.

рис.3, где наклонной тонкой прямой изображен график функции (3) с расчетным параметром C_{cl} , а толстой кривой линией - измеренная функция $N_c = N_c(\varepsilon_l)$.

Далее определяются (см., например, [4]):

- среднее арифметическое $\bar{C}_{cl(m)}$ значений $C_{cl(j)}$ параллельных $m=5$ годных измерений продольной жесткости на растяжение корда $\bar{C}_{cl(m)} = 494,840 \text{ Н}$;

- среднеквадратическую погрешность отдельного измерения продольной жесткости на растяжение корда $s_m = 29,713 \text{ Н}$;

- погрешность результата расчета $\bar{C}_{cl(m)}$ с надежностью $\alpha = 0,95$ $\kappa = \pm 36,941 \text{ Н}$.

Результаты вычислений означают, что с вероятностью 95% истинное значение определяемой величины C_{cl} для корда 23КНТС лежит в пределах:

$$C_{cl} = (495 \pm 37) \text{ Н}.$$

(Здесь величины округлены до целых чисел).

Точность (воспроизводимость) метода характеризуется коэффициентом вариации v_m , который в данном случае равен

$$v_m = 0,06.$$

Далее по формуле (4) определяется модуль упругости корда с учетом того, что диаметр нити равен $d_c = 0,7 \text{ мм}$:

$$E_{cl} = (1286,23 \pm 96,14) \text{ МПа}.$$

Выше был описан способ определения продольного модуля упругости для капронового корда с помощью экспериментов над одиночными нитями, извлеченными из готовой шины. Наряду с этим был использован и другой метод нахождения модуля - с помощью растяжения полосок из свулканизованного резинокордного полотна, вырезанных вдоль нитей так, чтобы в полоске содержалось сразу несколько нитей. Заметим, что для удобства расчетов количество нитей в полоске бралось равным 10.

При обработке результатов эксперимента использовался принцип смесей для расчета усредненного модуля упругости E_L и коэффициента Пуассона ν_{LT} резинокордного полотна, армированного параллельными нитями. Этот принцип используется во многих работах по механике армированных пластиков (см., например, [5]). Согласно ему

$$E_L = E_{cl} \cdot \zeta_c + E_g \cdot (1 - \zeta_c), \quad \nu_{LT} = \nu_{clT} \zeta_c + \nu_g \cdot (1 - \zeta_c). \quad (5)$$

Здесь:

E_{cl} и E_g - модуль упругости корда и модуль упругости резины соответственно;

ν_{cl}, ν_g - коэффициенты Пуассона для корда и резины соответственно;

E_L - усредненный модуль упругости прорезиненного листа в направлении нитей L;

ν_{LT} - усредненный коэффициент Пуассона для обрешиненного листа, характеризующий поперечное (в направлении оси T) сокращение при растяжении в направлении оси L;

ζ_c - коэффициент объемного содержания корда в прорезиненном листе. Он равен отношению площади нитей в поперечном сечении к общей площади поперечного сечения:

$$\zeta_c = \frac{\pi d_c^2 i_0}{4 h_0}$$

где $i_0 = 1/t_c$ - частота корда в листе, t_c - шаг корда в листе, h_0 - толщина прорезиненного листа.

Испытания резинокордных ленточек проводились на разрывной машине ZT-40. Образцы перед испытанием подвергались механическому кондиционированию, заключающемуся в том, что они предварительно в течение 4-х часов растягивались на 2% в направлении оси L, а затем получали отдых в течение 24-х часов. Испытания всех образцов проводились с постоянной скоростью $V=50$ мм/мин при температуре окружающей среды $T = (20 \pm 2)^\circ\text{C}$.

Ниже приводятся результаты испытания образцов из шинного корда 23КНТС, обрешиненного каркасной резиной 2и8338. Рабочая длина образцов принималась равной 150 мм, ширина - 9,1 мм. Толщина составляла 1,14 мм, частота нитей - 11 нитей на 1 см. Итак:

$$l_0 = 150 \text{ мм}, b_0 = 9,1 \text{ мм}, h_0 = 1,14 \text{ мм}, i_0 = 11 \text{ см}^{-1}.$$

Количество испытываемых образцов равнялось $m = 6$.

Для вычисления модуля упругости корда из выражения (5) получим следующую формулу:

$$E_{cl} = [E_L - E_g \cdot (1 - \zeta_c)] \cdot \frac{1}{\zeta_c}, \quad (6)$$

где E_L - пока неизвестный модуль упругости резинокордного образца, который будет определяться по результатам испытаний на растяжение вдоль направления нитей.

Испытания показывают, что диаграмма $N = N(\Delta\ell)$, где N - растягивающее усилие, а $\Delta\ell$ - приращение длины рабочего участка образца, представляет собой весьма пологую кривую на участке $0 \leq N \leq 180$ Н, которую можно аппроксимировать линейной функцией

$$N = k\Delta\ell.$$

Для образца номер $j = 4$ были получены:

$k_{(4)} = 34,22$ кН/м - коэффициент пропорциональности;

$r_{(4)}(\Delta\ell, N) = 0.9956$ - выборочный коэффициент корреляции;

$$E_L = \frac{(k_{(4)} \cdot \ell_0)}{F_0} = 494,76 \text{ МПа} - \text{модуль упругости образца.}$$

Результаты определения модулей упругости для шести образцов представлены в таблице 2.

Таблица 2. Выборка $m=6$ параллельных годных определений модуля упругости E_L для резинокордных образцов.

j	1	2	3	4	5	6
$E_{L(j)}$, МПа	492,17	447,43	475,41	494,76	477,19	477,15

Из таблицы 2 находим:

- среднее арифметическое значение модуля упругости образцов

$$\bar{E}_{L(m)} = 477,40 \text{ МПа};$$

- среднеквадратическую погрешность отдельного измерения модуля упругости образцов

$$s_m = 16,76 \text{ МПа};$$

- погрешность результата анализа $\bar{E}_{L(m)}$ с надежностью $\alpha = 0,95$

$$\kappa = \pm 17,58 \text{ МПа};$$

- коэффициент варiances, характеризующий точность метода

$$v_m = s_m / \bar{E}_{L(m)} = 0,035.$$

Результаты вычислений означают, что с вероятностью 95% истинное значение определяемой величины модуля упругости резинокордных образцов E_L лежит в пределах:

$$E_L = (477,40 \pm 17,58) \text{ МПа.}$$

Теперь по формуле (6), зная значения E_L и E_g , определяется модуль корда из резинокордного образца:

$$E_{cl} = (1278,17 \pm 47,35) \text{ МПа.}$$

В описанных выше экспериментах с одиночными нитями было получено

$$E_{cL} = (1286,23 \pm 96,14) \text{ МПа.}$$

Сравнение этих двух выражений (разница между ними составляет 0,6%) показывает, что эксперимент над резинокордными ленточками эквивалентен эксперименту над одиночным кордом, вынутым из новой шины.

Из экспериментов над резинокордными ленточками можно также вычислить продольную жесткость нити

$$C_{cL} = E_{cL} F_c = (492 \pm 18) \text{ Н.}$$

Для определения значения коэффициента Пуассона ν_{LT} резинокордного материала были проведены замеры ширины $b_{1(j)}$ у шести резинокордных ленточек, подвергнутых действию растягивающего усилия $N=100\text{Н}$. Замеры проводились калиброммером с индикаторной головкой класса 0,01 мм. Продольные деформации вычислялись из диаграммы растяжения образцов также для растягивающего усилия $N = 100 \text{ Н}$. В таблице 3 даны результаты $b_{1(j)}$, $\varepsilon_{(j)}^l$, $\Delta \ell_{(j)}$, $\varepsilon_{(j)}$, $\nu_{LT(j)}$ для шести испытанных образцов. Из этой таблицы находим:

- среднее арифметическое значение коэффициента Пуассона

$$\bar{\nu}_{LT(m)} = 0,5013;$$

- среднеквадратическую погрешность отдельного измерения коэффициента Пуассона

$$s_m = 7,071 \cdot 10^{-4};$$

- погрешность результата анализа $\bar{\nu}_{LT(m)}$ с надежностью $\alpha = 0,95$

$$k = \pm 7,41 \cdot 10^{-4}.$$

Следовательно, $\nu_{LT} = \bar{\nu}_{LT(m)} \pm |k| = (0,5013 \pm 0,0007419)$

Коэффициент вариаций в этом случае равен

$$v_m = s_m / \bar{\nu}_{LT(m)} = 1,41 \cdot 10^{-3}.$$

Таблица 3. Выборка 6-ти параллельных годных определений значений $b_{l(j)}, \varepsilon'_{(j)}, \Delta \ell_{(j)}, \varepsilon_{(j)}, \nu_{LT(j)}$ для резинокордных образцов.

j	1	2	3	4	5	6
$b_{(j)}, \text{ мм}$	10,39	9,96	10,09	10,10	10,09	10,09
$b_{l(j)}, \text{ мм}$	10,30	9,87	10,00	10,01	10,00	10,00
$\varepsilon'_{(j)} = \frac{b_{l(j)} - b_{(j)}}{b_{(j)}}$	$-8,662 \cdot 10^{-3}$	$-9,036 \cdot 10^{-3}$	$-8,920 \cdot 10^{-3}$	$-8,911 \cdot 10^{-3}$	$-8,920 \cdot 10^{-3}$	$-8,920 \cdot 10^{-3}$
$\ell_0, \text{ мм}$	150,0	150,0	150,0	150,0	150,0	150,0
$\Delta \ell_{(j)}, \text{ мм}$	2,59	2,71	2,67	2,66	2,67	2,67
$\varepsilon_{(j)} = \frac{\Delta \ell_{(j)}}{\ell_0}$	$1,727 \cdot 10^{-2}$	$1,807 \cdot 10^{-2}$	$1,780 \cdot 10^{-2}$	$1,773 \cdot 10^{-2}$	$1,780 \cdot 10^{-2}$	$1,780 \cdot 10^{-2}$
$\nu_{LT(j)} = \frac{ \varepsilon'_{(j)} }{\varepsilon_{(j)}}$	0,5017	0,5002	0,5001	0,5025	0,5011	0,5011

Теперь, используя вторую формулу (5) и зная ν_{LT} и ν_g , без труда находим главный коэффициент Пуассона для корда 23КНТС:

$$\nu_{cLT} = \frac{\nu_{LT} - \nu_g(1 - \zeta_c)}{\zeta_c} = 0,520 \pm 0,002.$$

Отметим, что такая методология экспериментального определения главного коэффициента Пуассона ν_{cLT} нитей корда предлагается впервые.

Из рис.2 и физического смысла совершенно очевидно, что побочный коэффициент Пуассона ν_{cTZ} текстильной нити шинного корда равен единице, то есть:

$$\nu_{cTZ} = 1.$$

Очень трудно предсказать модуль сдвига G_{LT} резинокордного листа (материала), изображенного на рис.1, если неизвестен модуль сдвига G_{cLT} самого текстильного корда.

Очевидно, что текстильный корд должен вносить существенный вклад в деформацию сдвига резинокордного листа и этот фактор должен быть

принят во внимание при разработке любой теории для определения общих сдвиговых характеристик резинокордных материалов.

Халпин и Цай [6] для предсказания (расчета) модуля сдвига G_{LT} резинокордного (рис. 1) материала предложили достаточно точную (когда нити корда материала подвержены растягивающим нагрузкам) формулу:

$$G_{LT} = G_g \cdot \frac{G_{cLT}(1 + \zeta_c) + G_g(1 - \zeta_c)}{G_{cLT}(1 - \zeta_c) + G_g(1 + \zeta_c)}. \quad (7)$$

Из формулы (7) легко определить модуль сдвига нитей корда G_{cLT} , если каким-либо способом найден модуль сдвига G_{LT} резинокордного материала, изображенного на рис.1. В самом деле, решая (7) относительно G_{cLT} , будем иметь:

$$G_{cLT} = G_g \frac{G_{LT}(1 + \zeta_c) - G_g(1 - \zeta_c)}{G_g(1 + \zeta_c) - G_{LT}(1 - \zeta_c)}. \quad (8)$$

Экспериментальные данные для определения G_{LT} были получены в результате испытания шести толстостенных резинокордных трубок (см. рис.4), сделанных из корда 23КНТС с нитями, параллельными осевой линии, и из резины шифра 2и8338. Для этой резины были установлены следующие значения упругих характеристик:

$$E_g = 4,400 \text{ МПа}; \quad \nu_g = 0,49; \quad G_g = \frac{E_g}{2(1 + \nu_g)} = 1,476 \text{ МПа}.$$

Резинокордные трубки имели коэффициент объемного содержания корда $\zeta_c = 0,3713$. Они подвергались действию крутящего момента $M_{кр} = 0,0566 \text{ Нм}$ при таком предварительном натяжении трубок, при котором в каждой нитке возникало растягивающее усилие $N = 10 \text{ Н}$.

Во время испытания резинокордных трубок на кручение, длина нитей корда не изменялась, поскольку крутящий момент $M_{кр} = 0,0566 \text{ Нм}$ вызывал сравнительно небольшие деформации сдвига, так что нити корда подвергались деформации чистого сдвига.

Модуль сдвига G_{LT} резинокордного материала трубок вычислялся по известной из сопротивления материалов формуле (см., например, [7, с. 93]):

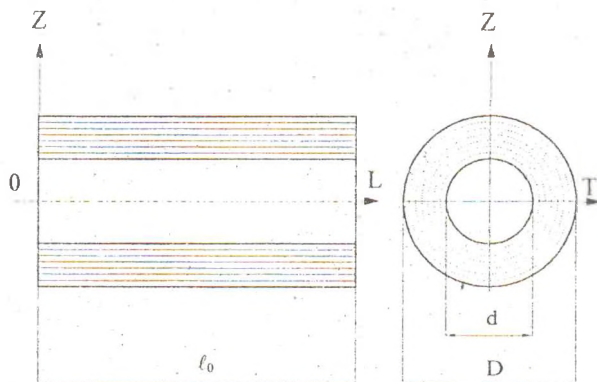


Рис. 4. Трубчатый резинокордный образец для испытания на кручение:

- O – центр прямоугольной системы координат;
- L – ось координат в направлении оси трубки;
- T и Z – оси координат в направлениях, перпендикулярных OL;
- ℓ_0 – длина рабочего участка образца;
- d – внутренний диаметр трубки;
- D – наружный диаметр трубки.

Испытывались образцы с геометрическими параметрами:

$$\ell_0 = 135 \text{ мм}, d = 30 \text{ мм}, D = 41 \text{ мм}.$$

$$G_{LT} = \frac{M_{кр} \cdot \ell_0}{\varphi \cdot I_p},$$

где $M_{кр}$ - крутящий момент, ℓ_0 - длина рабочего участка трубчатого образца, φ - угол поворота концевых сечений трубчатых образцов друг относительно друга;

$I_p = \frac{\pi D^4}{32} \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4 \right]$ - полярный момент инерции поперечного сечения трубки. Здесь D и d - внешний и внутренний диаметры трубки соответственно. В нашем случае $M_{кр} = 0,0566$ Нм, $\ell_0 = 135$ мм, $D = 41$ мм, $d = 30$ мм, $I_p = 0,001979$ м².

Результаты испытаний шести трубчатых образцов и рассчитанные по ним модули G_{LT} сведены в таблицу 4.

Таблица 4. Выборка $m = 6$ параллельных годных определений φ и G_{LT} для трубчатых резинокордных образцов.

j	1	2	3	4	5	6
φ_j , радиан	$1,7456 \cdot 10^{-2}$	$1,7470 \cdot 10^{-2}$	$1,7402 \cdot 10^{-2}$	$1,7438 \cdot 10^{-2}$	$1,7471 \cdot 10^{-2}$	$1,7501 \cdot 10^{-2}$
$G_{LT(j)} = \frac{M_{кр} \cdot \ell_0}{\varphi_j I_p}$, МПа	2,2119	2,2101	2,2187	2,2142	2,2100	2,2063

В соответствии с таблицей 4 вычисляем:

- среднее арифметическое значение модуля сдвига $\overline{G}_{LT} = 2,2119$ МПа;
- среднеквадратическую погрешность отдельного измерения $s_m = 0,004271$ МПа;
- погрешность результата анализа $\overline{G}_{LT(m)}$ с надежностью $\alpha = 0,95$
 $\kappa = \pm 0,004481$ МПа.

Результаты вычислений означают, что с вероятностью 95% истинное значение модуля сдвига G_{LT} резинокордного материала лежит в пределах

$$G_{LT} = \overline{G}_{LT(m)} \pm |\kappa| = (2,2119 \pm 0,004481) \text{ МПа.}$$

Коэффициент вариации равен: $v_m = s_m / \overline{G}_{LT(m)} = 1,93 \cdot 10^{-3}$.

Подставляя теперь полученное значение $G_{cl.T}$ в формулу (8), а также значения G_b и ζ_c , находим искомое значение модуля сдвига шинного корда 23КНТС:

$$G_{cl.T} = (4,900 \pm 0,036) \text{ МПа.}$$

Следует отметить, что конструкция образцов и методология измерения модуля сдвига $G_{cl.T}$ текстильной нити шинного корда предложена и реализована впервые.

Итак, установлено, что текстильные нити шинного корда при усилениях, которые реально возникают в них от эксплуатационных нагрузок, следует рассматривать как линейно упругий транслопный армирующий материал. Впервые предложена и реализована методология измерения транслопных упругих констант текстильного шинного корда. Выведены формулы и по этим формулам, а также экспериментальным данным рассчитаны следующие упругие константы для нитей текстильного корда 23КНТС:

E_{cl} - главный (продольный) модуль упругости;

$\nu_{cl.T}$ - главный коэффициент Пуассона (то есть параметр, характеризующий сжатие корда в поперечном направлении, при осевом растяжении);

$G_{cl.T}$ - модуль сдвига.

Установлено, что побочный коэффициент Пуассона нити корда

$$\nu_{ctz} = 1.$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Brewer H.K. Tire Stress and Deformation from Composite Theory// Tire Science and Technology, TSTCA, Vol. 1, № 1, Feb., 1973, p. 47-76.
2. Гончаров В.Л. Теория интерполирования и приближения функций. ГИТТЛ. -М.: 1954, 327 с.
3. Маркович Э.С. Курс высшей математики с элементами теории вероятностей и математической статистики. Изд-во «Высшая школа». -М.:1972. 480 с.
4. Алексеев Р.И., Коровин Ю.И. Руководство по вычислению и обработке результатов количественного анализа. Атомиздат, -М.: 1972, 72 с.
5. Whitney J.M. Elastic Moduli of Unidirectional Composite Theory With Anisotropic Filaments// Journal of Composite Materials, Vol. 1, 1967, p. 188-193.
6. Halpin J.C., Tsai S.W.// U.S. Air Force Materials Laboratory Report AFML-TR-67-423, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, 1968.
7. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов: учебник для ВТУЗов -9-е изд., перераб., -М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. 1986. -512 с.