

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РЕЗИН ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ШИН

Ю.К. Растеряев

Государственный НИИ крупногабаритных шин, г. Днепропетровск

ПРЕАМБУЛА

Пневматическая шина, – оболочка вращения с двоякой кривизной, конструкция стенок которой состоит из разных изотропных резиновых и различных анизотропных резинокордных слоев, что делает решение задачи расчета ее напряженно-деформированного и теплового состояний предельно тяжелым, а, стало быть, и задачи проектирования шины с наилучшим балансом свойств. Поэтому в течение многих десятилетий разработка пневматических шин осуществлялась методом Томаса Алва Эдисона, когда материалы для корда и резин подбирались при помощи экспериментов, а конструктивные параметры шины определялись большей частью способом пробных попыток.

Однако, в течение последних 30-35 лет были достигнуты значительные успехи как в понимании физического смысла, так и в математическом моделировании эксплуатационных качеств шины. Существует несколько причин такому положению.

Одной из них является *возникновение теории композитных материалов как отрасли механики*, отчасти благодаря толчку, связанному с бурным развитием авиационной техники, а отчасти благодаря мощному толчку, связанному с развитием аэрокосмических технологий, что привело к более глубокому пониманию работы резинокордных композитов, используемых как конструкционный материал для пневматических шин.

Другой причиной является *быстрое развитие приборов и технологий различных измерений*, что позволило инженерам, занимающимся конструированием пневматических шин, получить значительно больший объем информации о своей продукции, чем когда-либо ранее.

Еще одна причина кроется в *возникновении сравнительно новых областей знания о трении и износе полимеров*. Углубленное понимание механизмов этих процессов в свою очередь позволило повысить силу сцепления и срок службы пневматических шин.

Наконец, *появление высокоскоростных цифровых вычислительных машин* впервые позволило выполнять точные расчеты напряжений, деформа-

ций и температур в шине, а также существенно облегчило обработку и анализ результатов.

Для того чтобы обеспечить соответствующие эксплуатационные характеристики диагональным и радиальным шинам, необходимо применять разные резины. Диагональная шина требует использования как минимум 5 различных резин, а для радиальных шин их может потребоваться не менее 10.

Каждая резина имеет свои физические и механические характеристики в зависимости от того, где она применяется: в протекторе, боковине, слоях корда каркаса, слоях корда брекера, внутреннем подкладочном слое, профиле борта, подканавочном слое, наполнителе борта, бортовом кодыце, бортовой ленте.

Каждая резина имеет свои функции и, большей частью, эти функции достаточно очевидны. На рис. 1 показано, где обычно размещаются эти резины в диагональной шине грузового автомобиля для тяжелых условий эксплуатации. На рис. 2 указаны места расположения различных резин в радиальной металлокордной шине грузового автомобиля, предназначенного для тяжелых условий эксплуатации.

В шинной промышленности пока нет общепризнанного мнения о том, какое количество различных резин необходимо использовать в пневматической шине и каков должен быть их состав. Однако при изучении литературы по шинам из разных доступных нам источников, становится очевидным, что многие изготовители либо в результате физических измерений, либо в результате экспериментов, поняли о необходимости задавать определенные значения характеристикам отдельных компонентов пневматической шины.

Целью настоящих исследований ставилось:

а). Привести по доступной нам современной информации механические и физические характеристики резин, наиболее важных для обеспечения эксплуатационных качеств пневматической шины;

б). Описать на основании экспериментальных данных упругие характеристики и механику деформирования шинных резин так, чтобы это описание давало достаточную для инженерной практики точность при расчетах напряжению - деформированного и теплового состояний пневматической шины.

По пункту а) поставленной цели исследований сразу отметим, что приводимые далее механические и физические характеристики резин не отражают свойств какой-либо отдельной шины или изготовителя, а, напротив, являются характерными значениями, которые были получены путем осреднения результатов по определенному количеству шин разных (но лучших) изготовителей. Эта информация может быть весьма полезна для математического моделирования эксплуатационных качеств шины, а также

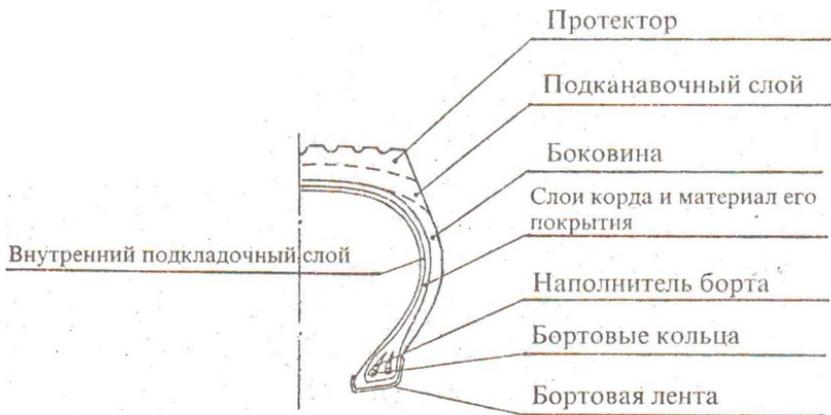


Рис. 1. Диагональная шина грузового автомобиля для тяжелых условий эксплуатации.

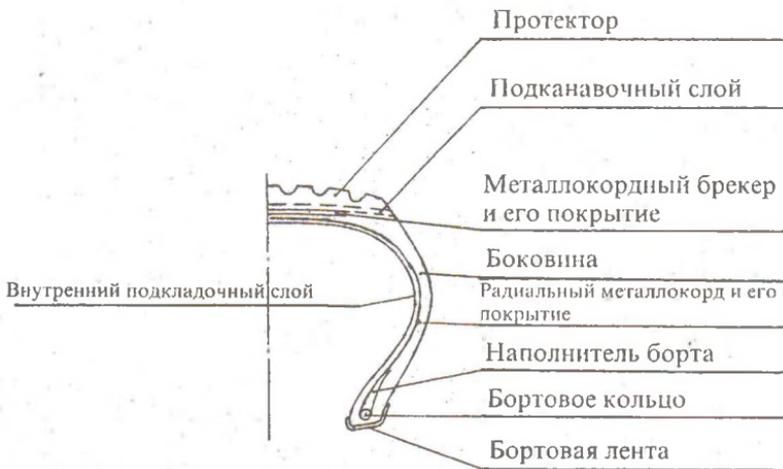


Рис. 2. Радиальная металлокордная шина грузового автомобиля для тяжелых условий эксплуатации.

для понимания всего спектра характеристик современной пневматической шины.

Стоимость материалов, включая корд, составляет приблизительно две трети общей стоимости изготовленной шины, следовательно, при изготовлении резин необходимо стремиться к достижению максимальной экономической эффективности. Однако критерием пригодности резины являются физические и механические характеристики, поэтому могут представлять интерес некоторые общие наблюдения, касающиеся типов резин и сажи, используемых для их изготовления.

ФУНКЦИИ И ХАРАКТЕРИСТИКА ШИННЫХ РЕЗИН

Основные функции резин в пневматической шине очевидны.

Резина, используемая при изготовлении протектора, должна обеспечивать износостойчивость, должна быть прочной и эластичной, чтобы свести к минимуму возможность порезов, проколов, разрывов и трещин, а также чтобы защитить корпус шины от повреждающих ударов. Желательно обеспечить низкие механические гистерезисные потери в материале протектора, поскольку более низкие рабочие температуры шины являются существенным преимуществом. Несомненно, очень важным является обеспечение для протектора шины хорошей характеристики трения при любых дорожных условиях.

Анализ показывает, что в зарубежной практике протектора как радиальных, так и диагональных шин легковых автомобилей выполняются на основе синтетических каучуков, обычно смеси СБР - БР (стирен-бутадиеновый каучук: бутадиеновый каучук). В зависимости от режима эксплуатации в шинах грузовых автомобилей применяются либо протекторные смеси, сходные с теми, которые используются в протекторах шин легковых автомобилей, либо натуральный каучук с небольшой добавкой дис-полибутадиена.

Важную роль в резине протектора имеют сажи (тип и пропорции). Из тридцати или около этого стандартных типов сажи в протекторах шин в настоящее время наиболее широко используются высокодисперсионные сажи HAF (High Abrasion Furnace) и сажа ISAF (Intermediate Super Abrasion Furnace), а также их высокоструктурные составляющие HS (High Structure) варианты. Установлено, что высокодисперсионные и высокоструктурные сажи обеспечивают несколько лучшую износостойчивость, сопротивление разрастанию и растрескиванию трещин, а также улучшают технологичность полимеров, используемых для изготовления протекторов. Физическое описание этих видов сажи дано в таблице 1.

Таблица 1. Описание некоторых видов сажи

Тип сажи	Средний диаметр частиц, А (Электронный микроскоп)	Площадь поверхности, м/г (БЕТ адсорбция азота)	Видимый объем при давлении 4,659 Мпа, см ³ /г
HMF (High Modulus Furnace)	460-660	30-45	1.20-1.46
FEF (Fine Extrusion Furnace)	310-580	36-48	1.40-1.70
HAF (High Abrasion Furnace)	260-350	62-88	1.45-1.60
ISAF (Intermediate Super Abrasion Furnace)	175-275	95-135	1.45-1.75
SAF (Super Abrasion Furnace)	140-270	120-145	1.55-1.75

Характерные рецептуры резиновых смесей для протекторов можно найти в технической литературе по резинам [1-4].

Резина каркаса диагональной шины должна образовывать прочные связи с текстильным кордом, покрытого связующим составом. Ее прочность и долговечность должны быть достаточными для того, чтобы изолировать нити корда и удерживать их в заданных положениях. Однако эта резина должна быть достаточно мягкой, чтобы обеспечить возможность для некоторого изменения угловой ориентации нитей корда при деформации шины. Резина каркаса служит в качестве изоляции между слоями текстильного корда, предохраняя его нити от перетираания. Для того чтобы противостоять циклической изгибной деформации, составляющая каркас шины резина должна обладать высокой усталостной прочностью. Очень важно, чтобы эта резина сохраняла адекватные физические свойства и долговечность при возникающих в процессе эксплуатации температурах внутри шины. Следовательно, резина каркаса шины должна обладать низкими механическими потерями энергии.

Резины каркаса в диагональных шинах легковых автомобилей представляют собой смеси натурального каучука и разнообразных видов синтетических веществ. Во многих случаях используется некоторое количество регенерированного каучука, поскольку это не ухудшает эксплуатационные качества, облегчает обработку и снижает затраты. Применяются сажи, обеспечивающие получение низкого модуля упругости (этим требованиям удовлетворяют угольные сажи с более крупными частицами, такие как FEF, SRF и GRF).

Резины каркаса диагональных шин грузовых автомобилей сходны с резинами каркаса диагональных шин легковых автомобилей, за исключением того, что их сопротивление разрыву и усталостные свойства улучшены за счет применения повышенной пропорции натурального каучука.

Характерные рецептуры резиновых смесей для каркасов пневматиче-

ских шин можно найти, например, в [1].

О резинах боковин пневматических шин. Вследствие более высокой окружающей податливости, циклы деформаций, действующие на боковины радиальных шин, отличаются от циклов деформаций в диагональных шинах и поэтому резины боковин радиальных шин приготавливаются таким образом, чтобы обеспечить повышенную усталостную прочность по сравнению с характеристиками резин для диагональных шин.

Все резиновые смеси для боковин подбираются так, чтобы они могли противостоять усталости, окислительному ухудшению и воздействию озона. Для того чтобы получить этот баланс характеристик, смеси натурального каучука, стирен-бутадиенового каучука (СБР) и цис-полибутадиена комбинируются с антиоксидантами, антиозонантами, парафинами и сажами; последние выбираются таким образом, чтобы получить низкий модуль и гистерезис. В резиновых смесях применяются каучуки, устойчивые к окислению и воздействию озона, поскольку боковина должна обладать соответствующей стойкостью и должна быть защищена от атмосферного старения. Примером каучуков, обладающих удовлетворительной устойчивостью к кислороду и озону без добавки протравливающих антиоксидантов и антиозонантов, являются галогенированный бутилкаучук и этилен-пропилен-диеновый каучук. К сожалению, самыми лучшими антиоксидантами и антиозонантами оказываются протравливающие материалы.

При изготовлении бортов диагональных шин легковых и грузовых автомобилей применяют обычно синтетические резиновые смеси, однако для достижения необходимых эксплуатационных качеств радиальных шин часто применяют большее количество натурального каучука.

О внутреннем прокладочном слое резины. Скажем, наконец, что большинство производителей используют низкую воздухопроводность бутилкаучука и/или регенерированного бутилкаучука для изготовления внутреннего прокладочного слоя бескамерных шин. По этой же причине внутренние камеры изготавливаются из бутилкаучука или галогенированного бутилкаучука, в зависимости от интенсивности режима эксплуатации. Применяемые в этих резинах типы сажи обеспечивают низкий модуль и удовлетворительную технологичность.

КОНСТРУКЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ РЕЗИНА

Резина как конструкционный материал имеет ряд характерных особенностей в свойствах, которые отличаются от свойств обычных конструкционных материалов.

Первая характерная особенность – это упругая деформативность резины, которая на несколько порядков выше, чем у металлов или даже у дерева.

Вторая характерная особенность резины состоит в том, что сопротивление разрыву и модуль упругости ее довольно низкие, а график зависимости относительной деформации от напряжения нелинейный при больших относительных деформациях (см. рис. 3).

Третья характерная особенность резины – это отсутствие площадки текучести на графике “напряжение – относительная деформация” в отличие от большинства обычных конструктивных материалов.

Четвертая характерная особенность резины заключается в ее способности восстанавливаться при больших деформациях после удаления напряжений.

Пятая характерная особенность резины состоит в том, что она имеет хорошую усталостную стойкость и очень высокую способность запасать (поглощать) энергию. Например, если обратиться к работе [5], то можно увидеть, что пружинная сталь способна поглощать (запасать) всего лишь 0,29 Дж/грамм материала, тогда как вулканизированный натуральный каучук поглощает 44,0 Дж/грамм материала. Вследствие этого обстоятельства резина представляет собой материал, идеально подходящий для изготовления пружин, шин и устройств виброизоляции всех типов.

При расчете напряженно-деформированного состояния многих конструкций (в том числе и пневматических шин) резину можно с достаточной точностью для инженерной практики рассматривать как абсолютно упругий материал. Тем не менее, резина имеет также и вязкую составляющую, которая проявляется в виде ползучести (см. рис. 4) или релаксации напряжений (см. рис. 5), а также при выделении внутренней тепловой энергии в процессе циклического деформирования. Это выделение тепла обусловлено явлением гистерезиса и, чаще всего, характеризуется численно при помощи тангенса угла механических потерь ($\operatorname{tg} \delta$), приведенного в таблицах 2 и 3. При этом,

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{E_g'}{E_g''},$$

где E_g' – динамический модуль упругости;

E_g'' – модуль потерь.



Рис. 3. График зависимости относительных деформаций от напряжений при растяжении для типичной резины.

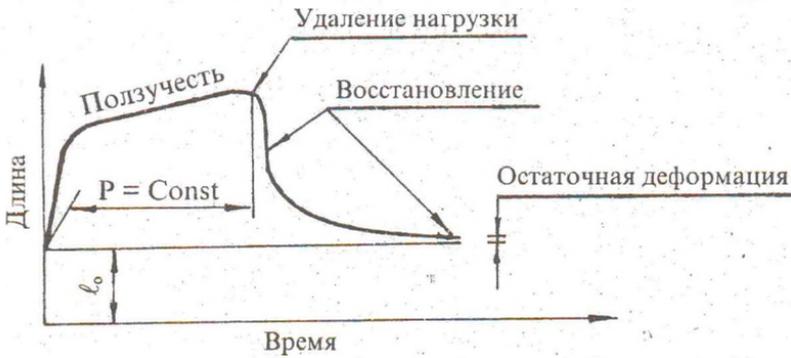


Рис. 4. Деформации при ползучести и восстановлении для типичной резины.

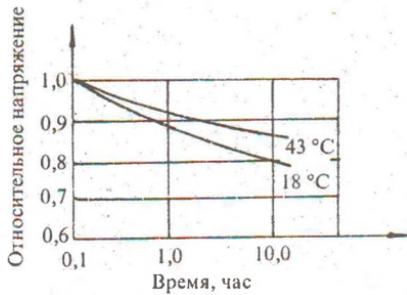


Рис. 5. Релаксация сжимающего напряжения для протекторной резины на основе СБР при постоянном 30%-ом сжатии.

Таблица 2. Физико-механические свойства резин диагональных с текстильным кордом шин грузового автомобиля для тяжелых условий эксплуатации.

Элементы шины	Твердость Шора А	Плотность г/см ³	Предельная прочность на разрыв (МПа)	Относительное удлинение при разрыве, (%)	Модуль упругости	
					статический, E _г (МПа)	динамический, E _г (МПа)
Протектор	62	1.15	20.8	500	3.1	4.8
Подканавочный слой	60	1.12	17.3	500	3.4	4.8
Боковина	60	1.12	20.8	600	2.3	4.1
Материал покрытия кордных слоев	60	1.12	17.3	500	2.8	3.8
Наполнитель борта	75	1.30	13.8	250	4.1	7.6

Таблица 2. Продолжение.

Элементы шины	tg δ $\frac{E_g}{E_g^*}$	Модуль сдвига		Теплопроводность	
		статический, G _г , (МПа)	динамический, G _г [*] , (МПа)	$\frac{\text{кал}}{\text{с} \cdot \text{см} \cdot ^\circ\text{C}}$	$\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{K}}$
Протектор	0.17	1.0	1.6	550 · 10 ⁻⁶	0.23
Подканавочный слой	0.15	1.1	1.6	525 · 10 ⁻⁶	0.22
Боковина	0.18	0.8	1.4	525 · 10 ⁻⁶	0.22
Материал покрытия кордных слоев	0.18	0.9	1.3	525 · 10 ⁻⁶	0.22
Наполнитель борта	0.40	1.4	2.5	600 · 10 ⁻⁶	0.25

Здесь E_г^{*} – модуль потерь;

tg δ – тангенс угла механических потерь.

Таблица 3. Физико-механические свойства резин радиальных с металлокордом в каркасе и брекре в шин грузового автомобиля для тяжелых условий эксплуатации.

Элементы шины	Твердость Шора А	Плотность г/см ³	Пределная прочность на разрыв (МПа)	Относительное удлинение при разрыве, (%)	Модуль упругости	
					статический, E_s (МПа)	динамический, E_d (МПа)
Протектор	65	1.15	24.2	500	4.1	6.6
Подканавочный слой	60	1.12	20.8	500	4.1	5.9
Боковина	60	1.10	20.8	600	2.8	4.1
Покрытие слоев металлокорда	80	1.20	20.8	350	5.2	8.3
Наполнитель борта	89-90	1.20	20.8	350	5.2	8.3

Таблица 3. Продолжение.

Элементы шины	tg δ	Модуль сдвига		Теплопроводность	
	$\frac{E_d}{E_s}$	статический, G_s , (МПа)	динамический, G_d , (МПа)	$\frac{\text{кал}}{\text{с} \cdot \text{см} \cdot ^\circ\text{C}}$	$\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$
Протектор	0.20	1.4	2.2	$600 \cdot 10^{-6}$	0.25
Подканавочный слой	0.17	1.4	2.0	$550 \cdot 10^{-6}$	0.23
Боковина	0.17	0.9	1.4	$550 \cdot 10^{-6}$	0.23
Покрытие слоев металлокорда	0.25	1.7	2.8	$600 \cdot 10^{-6}$	0.25
Наполнитель борта	0.25	1.7	2.8	$600 \cdot 10^{-6}$	0.25

Физико-механические характеристики резины изменяются в зависимости от температуры быстрее, чем характеристики большинства традиционных конструкционных материалов. Они также зависят от частоты, что показали Вильямс, Ландел и Ферри в работе [6] или Дж. Ферри в работе [7].

Причем, повышение частоты оказывает на физико-механические характеристики резины такое же влияние, как понижение температуры.

К счастью, в интервале температур, в котором работают резины в шине, изменения модуля упругости невелики; кроме того, гистерезис уменьшается с повышением температуры. Для типичной шины, приведенные численные значения, изменяются незначительно при переходе от статического состояния к режиму качения. Одна из характеристик шины, а именно сопротивление качению, несколько снижается в период начального разогрева вследствие снижения $\lg \delta$ при росте температуры; этот эффект в меньшей степени проявляется в отношении модуля упругости.

Еще одной характерной особенностью резин является то, что их физико-механические свойства непостоянны. В частности, модуль упругости и гистерезис зависят от траектории относительной деформации и старения образца. Что касается последнего, то современные резины лучших мировых производителей шин изменяются незначительно вследствие старения в пределах всего интервала времени их эксплуатации. Однако траектория относительной деформации является важным фактором и картина еще более усложняется вследствие того, что поведение резин является обратимым в различной степени, в зависимости от времени и температуры.

Влияние траектории относительной деформации на поведение резины рассматривали Муллинз [8] и Пэйн [9]. Они обнаружили, что все резины разупрочняются под действием повторных циклов деформации. Этот эффект более заметен в резинах, армированных¹ сажей, причем эффект проявляется тем сильнее, чем выше содержание армирующей сажи. *Это является одной из причин необходимости приработки шины до выполнения на них соответствующих измерений.* Обкатка шины при умеренных условиях позволяет в некоторой степени достичь равновесного состояния как кордов, так и резиновых компонентов, значительно повышает долговечность шины. *Обкатанная при умеренных условиях шина не будет разрушаться так быстро при тяжелом режиме испытаний, как необкатанная* [10].

Отметим, что все динамические характеристики резин, приведенные в таблицах 2 и 3, относятся к стабилизированным характеристикам.

Из таблиц 2 и 3 видно, что коэффициент Пуассона резин ν_g очень близок к значению 0.5, поскольку $E_g \approx 3 \cdot G_g$. А это означает, что резины можно считать изотропными материалами, ибо выполняется соотношение для изотропных материалов:

¹ Термин "армирующая сажа" использован для обозначения мелкодисперсной сажи, которая значительно повышает модуль и сопротивление износу. Неармирующая сажа с более крупными частицами используется в первую очередь как наполнитель, позволяющий снизить стоимость или повысить технологичность.

$$G_g = \frac{E_g}{2(1 + \nu_g)}$$

При больших деформациях (что, впрочем, редко встречается, если вообще встречается, в эксплуатации) коэффициент Пуассона незначительно изменяется; для твердой резины и эбонита коэффициент Пуассона всегда несколько меньше 0.5. Для сравнения напомним, что коэффициент Пуассона металлов равен приблизительно 0.3.

Равенство коэффициента Пуассона 0.5 означает, что резины являются несжимаемыми материалами и этот факт необходимо учитывать при конструировании элементов, в которых резина работает на сжатие, поскольку необходимо предусматривать пространство для бокового распора, если резиновый элемент подвергается сжатию.

Динамические свойства резин, представленные в таблицах 2 и 3, с инженерной точки зрения являются важными, поскольку резины чаще всего используют именно таким образом.

Динамический модуль упругости резин всегда больше статического [11]. Отношение динамического модуля упругости к статическому может изменяться от значения несколько большего единицы и до значений 2 и более; в первую очередь это зависит от явления гистерезиса в резине. Гистерезис, в свою очередь, зависит от типа прлимера, содержания и типа сажи, интенсивности вулканизации, температуры при испытаниях и других факторов. Подробно это было продемонстрировано в работе Студебекера и Битти [12].

Указанные в таблицах 2 и 3 динамические характеристики резин были получены при частоте 10 Гц, статической относительной деформации 10 % и динамической относительной деформации $\pm 5\%$.

В таблицах 2 и 3 приводится также теплопроводность, ибо она является основной характеристикой резин, важной как при их приготовлении, так и при использовании.

Перенос тепловой энергии имеет существенное значение при вулканизации шины, а также оказывает влияние на эксплуатационные характеристики вулканизированной шины.

Теплопроводность невулканизованных и вулканизованных каучуков практически одинакова.

Теплопроводность является важным показателем с точки зрения эксплуатационных характеристик из-за выделения энергии в шине при циклическом деформировании во время ее вращения под нагрузками. Резина (любая) имеет низкую теплопроводность, поэтому генерируемая внутри

шины тепловая энергия, с существенными затруднениями отводится к наружной поверхности, где может происходить рассеивание тепла. Если тепло из толстых участков шины отводится в недостаточной степени, то может наблюдаться преждевременное разрушение участков вследствие термического разложения материала.

К сожалению, отметим, что теплопроводность снижается с ростом температуры.

Присутствие сажи оказывает компенсирующее влияние на теплопроводность, что можно видеть из таблицы 4.

Таблица 4. Теплопроводность $\left(\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}\right)$

Каучук	Наполненная смесь	С сажей, 50 частей на сотню
Натуральный	0.153	0.280
СБР	0.190 – 0.250	0.300
БР	0.210	0.320

Отметим еще, что результаты измерений, приведенные в таблицах 2 и 3, относятся к температурному интервалу 30 °С; следовательно, при более высоких температурах, встречающихся при эксплуатации шин, теплопроводность несколько снижается.

В преамбуле сказано, что для обеспечения необходимых физико-механических характеристик разным частям шины производителями были разработаны различные резины. Даже без учета фактора стоимости, получить оптимальное сочетание всех необходимых характеристик очень трудно, если вообще возможно.

Если оптимизируется одна характеристика, то остальными, в некоторой степени, приходится пренебрегать. Каждая резина представляет собой наилучший компромисс с точки зрения важных характеристик или оптимизируемых характеристик.

В этом смысле для протекторной резины желательными являются хорошие показатели сопротивления истиранию, сопротивления заносу на мокрой и сухой дороге, сопротивления разрастанию трещин и низкий гистерезис.

Если выполняется подканавочный слой, то для него важным является низкий гистерезис и удовлетворительная связь с резинокордным композитом, составляющим брекер в радиальной шине или каркас в диагональной шине.

Для резины боковины важны удовлетворительные усталостная прочность, сопротивление воздействию кислорода и озона, а также хорошая технологичность при формовании; при этом гистерезис и сопротивление истиранию являются вторичными показателями.

Материал (резина) покрытия текстильного корда каркаса должен иметь хорошую технологичность, удовлетворительную адгезию, низкий гистерезис и хорошую усталостную прочность.

Материал покрытия каркаса и брекера с металлическим кордом обычно должен иметь более высокий модуль упругости, чем для каркаса из текстильного корда. Это необходимо для того, чтобы обеспечить лучшую адгезию с оцинкованной стальной проволокой, которая обладает высоким модулем упругости. Резины, имеющие высокий модуль упругости, также вносят свой вклад в достижение необходимой жесткости композита "резина-металлический корд" в брекере и каркасе со стальным кордом. Важными факторами здесь являются высокое сопротивление разрыву и прочность на сдвиг, а также удовлетворительная усталостная прочность.

Наполнитель борта и резины, используемые в зоне борта шины, должны иметь высокий модуль упругости и хорошую адгезию; при этом можно пренебречь многими другими физико-механическими характеристиками, которые не являются столь важными с точки зрения общих эксплуатационных качеств шины.

Внутренний подкладочный слой бескамерной шины должен иметь удовлетворительное сопротивление изгибу, особенно в радиальных шинах. Он должен быть отлит без каких-либо дефектов и обычно формируется таким образом, чтобы обеспечить низкую воздухопроницаемость.

Итак, в таблицах 2 и 3 суммированы из разных, но лучших типов шин, физико-механические характеристики критически важных компонентов, которые считаются определяющими с точки зрения эксплуатационных качеств шин.

Подводя итог вышесказанному материалу, отметим, что если в лучших образцах диагональных и радиальных шин используется два, в крайнем случае, три типа кордов, то различных типов резин в этих же шинах используется, как правило, от пяти до десяти. При этом каждая из резин имеет свои индивидуальные физические и механические свойства. Это обстоятельство позволяет считать резины более важными по функциональному назначению в конструкции шины, чем корд.

УПРУГИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕЗИН ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ШИН

Согласно вышесказанному тексту, будем в дальнейшем рассматривать любую резину, используемую в пневматических шинах в качестве того или иного конструкционного элемента, как упругий однородный изотроп-

ный материал, обладающий двумя независимыми константами упругости.

В структурном анализе составных резинокордных систем оказывается удобным в качестве независимых констант использовать модуль упругости E_g и коэффициент Пуассона ν_g резины.

Что касается модуля сдвига G_g и объемного модуля K_g резины, которые используются в некоторых задачах механики, то их можно определить через независимые константы по следующим формулам:

$$G_g = \frac{E_g}{2(1 + \nu_g)}, \quad K_g = \frac{E_g}{3(1 - 2\nu_g)}.$$

При определении модуля упругости E_g той или иной резины необходимо тщательно изучить ее поведение под воздействием растягивающих усилий N , равных растягивающим нагрузкам P .

В нашем случае изучение поведения резины шин осуществлялось при лабораторных испытаниях образцов, изготовленных из этих резины, на малоинерционной разрывной машине ZT-40.

Разрывная машина ZT-40 автоматически вычерчивает график зависимости между растягивающими нагрузками $P=N$ и абсолютными удлинениями $\Delta\ell$ образца резины. Иными словами, разрывная машина дает (рис.6) графическое изображение функции $N=N(\Delta\ell)$. Этот график принято называть диаграммой растяжения образца резины.

Для образца любой резины автомобильной шины диаграмма растяжения $N=N(\Delta\ell)$ на участке сравнительно небольших ($0 \leq \varepsilon \leq 0,16$) относительных линейных деформаций (где $\varepsilon = \Delta\ell/\ell$ и ℓ - первоначальная длина рабочего участка образца), которые реально реализуются при эксплуатации автомобильной шины, представляет собой весьма пологую кривую (рис. 6), мало отличающуюся от прямой линии. Это еще раз подтверждает то, о чем говорилось выше, что для расчета напряженно-деформированного состояния пневматической шины, резину можно (с достаточной степенью точности для инженерной практики) рассматривать как линейно упругий материал, то есть аппроксимировать экспериментально полученную для образца резины с помощью разрывной машины пологую кривую $N=N(\Delta\ell)$ на участке $0 \leq \varepsilon \leq 0,16$ линейной функцией

$$N = k \cdot \Delta\ell. \quad (1)$$

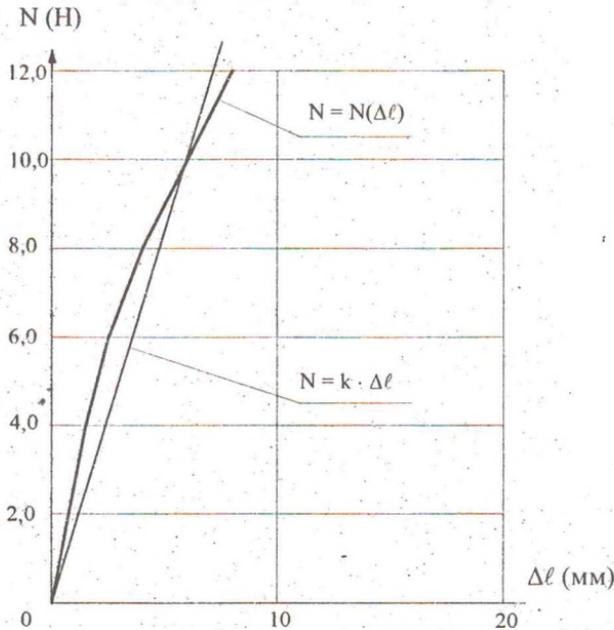


Рис.6. Диаграмма растяжения образца с номером $j = 6$ из каркасной резины маркировки 2и8338

(состав: 100СКИ-3 + 10РКТ + 40ПМ50)

$V = 70$ мм/мин - скорость растяжения образца;

$\ell = 50$ мм - исходная длина рабочего участка образца;

$b = 10$ мм - исходная ширина образца;

$h = 1.89$ мм - исходная толщина образца.

Следовательно, на первом этапе общая задача по определению значения модуля упругости E_g резины свелась к задаче нахождения значения коэффициента пропорциональности k .

Поставим задачу о нахождении такого значения коэффициента k , при котором функция (1) будет наилучшим образом соответствовать опытными данным, взятым из диаграммы растяжения $N=N(\Delta\ell)$ на участке $0 \leq \varepsilon \leq 0,16$.

За меру отклонения аппроксимирующей функции (1) от опытных данных с номером i выбираем величину

$$[N_{(i)} - k \cdot \Delta\ell_{(i)}]^2.$$

В качестве меры общей ошибки $S(k)$ в описании опытных данных функцией (1) возьмем сумму мер отклонений для всех n опытных данных:

$$S(k) = \sum_{i=0}^n [N_{(i)} - k \cdot \Delta \ell_{(i)}]^2. \quad (2)$$

Величина константы k , входящей в формулу (2), определяется методом наименьших квадратов [13]. Минимум $S(k)$ находится из условия

$$\frac{dS(k)}{dk} = 0$$

и константа k при этом равна

$$k = \frac{\sum_{i=0}^n N_{(i)} \cdot \Delta \ell_{(i)}}{\sum_{i=0}^n \Delta \ell_{(i)}^2}. \quad (a)$$

Для оценки силы (тесноты) линейной связи случайных величин N и $\Delta \ell$ в уравнении регрессии (1) использована, согласно теории вероятности и математической статистики [14, с. 420 - 470], безразмерная величина $r(\Delta \ell, N)$, которая называется выборочным коэффициентом корреляции:

$$r(\Delta \ell, N) = \alpha \cdot \frac{\sqrt{n \cdot \sum_{i=0}^n \Delta \ell_{(i)}^2 - \left(\sum_{i=0}^n \Delta \ell_{(i)} \right)^2}}{\sqrt{n \cdot \sum_{i=0}^n N_{(i)}^2 - \left(\sum_{i=0}^n N_{(i)} \right)^2}},$$

где

$$\alpha = \frac{n \cdot \sum_{i=0}^n \Delta \ell_{(i)} \cdot N_{(i)} - \sum_{i=0}^n \Delta \ell_{(i)} \cdot \sum_{i=0}^n N_{(i)}}{n \cdot \sum_{i=0}^n \Delta \ell_{(i)}^2 - \left(\sum_{i=0}^n \Delta \ell_{(i)} \right)^2}.$$

Выборочный коэффициент корреляции обладает рядом свойств. В частности, в нашем случае равенство

$$|r(\Delta \ell, N)| = 1$$

выполняется лишь при строгом выполнении функциональной линейной зависимости (1). Обычно коэффициент корреляции меньше единицы и, чем ближе он к ней, тем точнее предлагаемая функция описывает набор экспериментальных данных.

После того, как определен коэффициент k , нетрудно определить модуль упругости E_g резины. С этой целью достаточно воспользоваться законом Гука для одноосного напряженного состояния [15]:

$$\Delta \ell = \frac{N \cdot \ell}{E_g \cdot F}, \quad (b)$$

где F - первоначальная площадь поперечного сечения образца.

Подставляя (1) в (b) и решая полученное относительно E_g , получаем, наконец, формулу для вычисления модуля упругости образца резины:

$$E_g = \frac{k \cdot \ell}{F}, \quad (c)$$

где коэффициент пропорциональности k на основании данных измерений рассчитывается по формуле (a).

Отметим, что для повышения воспроизводимости результатов опыта, образцы резины перед испытанием получали механическое кондиционирование, заключающееся в том, что эти образцы предварительно в течение 4-х часов подвергались деформации растяжения равной 5%, а затем получали 12 часов отдыха.

Поскольку упругие свойства любой резины зависят от скорости деформирования и температуры, то для сопоставимости результатов опыта испытания всех образцов проводились с одинаковой постоянной скоростью растяжения $V=70$ мм/мин и при одинаковой температуре окружающей среды $T=(20 \pm 2)^\circ\text{C}$. Рабочая длина ℓ и ширина b образца составляли соответственно 50 мм и 10 мм. Количество испытываемых образцов для каждой маркировки резины было не менее 5. В таблице 5 приведены опытные данные, полученные при испытании образца с порядковым номером $j=6$ из резины 2и8338, предназначенной для основных слоев каркаса с полиамидным кордом. Там же приведены рассчитанные величины для этого образца: $k_{(6)}$ - коэффициент пропорциональности; $r_{(6)}(\Delta \ell, N)$ - выборочный коэффициент корреляции; $E_{g(6)}$ - модуль упругости резины.

Из табл. 5 видно, что выборочный коэффициент корреляции $r_{(6)}(\Delta \ell, N)$ для образца резины $j=6$ мало отличается от единицы. Поэтому формула (1) весьма точно с инженерной позиции воспроизводит измерен-

ную связь $N=N(\Delta\ell)$ между усилиями N и абсолютными деформациями $\Delta\ell$ в резине, что хорошо видно из рис.6, где тонкая прямая линия изображает график функции (1) с расчетным параметром $k_{(6)}$ из табл.5, а жирная кривая линия - график измеренной функции $N=N(\Delta\ell)$.

Таблица 5. Результаты испытания образца с номером $j=6$ на растяжение. Образец из каркасной резины маркировки 2и8338.

№ опытных данных i	Опытные данные		Рассчитанные параметры		
	$N(i)$, Н	$\Delta\ell(i)$, мм	$k_{(6)}$, Н/мм	$r_{(6)}(\Delta\ell, N)$	$E_{g(6)}$, МПа
0	0,0	0,0			
1	2,0	1,0			
2	4,0	1,5			
3	6,0	2,5	1,681	0,9781	4,447
4	8,0	4,0			
5	10,0	6,0			
6	12,0	8,0			

Помимо образца с номером $j=6$ было испытано еще пять образцов каркасной резины шифра 2и8338 и по результатам испытаний были определены их модули упругости $E_{g(j)}$. В таблице 6 приведены результаты определений $E_{g(j)}$ для всех шести испытанных образцов из резины 2и8338.

Таблица 6. Выборка значений $E_{g(j)}$ шести параллельных годных определений модуля упругости E_g для каркасной резины 2и8338.

j	1	2	3	4	5	6
$E_{g(j)}$, МПа	4,306	4,391	4,400	4,409	4,447	4,447

Полученные значения $E_{g(j)}$ искомого модуля резины содержат случайные ошибки, которые можно учесть в среднем статистическими приемами. Это осуществляется так. В соответствии с данными таблицы 6 вычисляются:

- среднее арифметическое $\bar{E}_{g(m)}$ значений $E_{g(j)}$ из m (в нашем случае $m=6$) параллельных годных определений модуля упругости E_g резины

$$\bar{E}_{g(m)} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m E_{g(j)} = \frac{1}{6} \cdot (4,306 + 4,391 + 4,400 + 4,409 + 4,447 + 4,447) = 4,400 \text{ МПа};$$

- среднеквадратическую погрешность отдельного измерения модуля упругости $E_{g(0)}$ резины

$$S_m = \sqrt{\frac{m}{m-1} \cdot \left\{ \frac{1}{m} \cdot \sum_{j=1}^m [E_{g(j)}]^2 - [\bar{E}_{g(m)}]^2 \right\}} = 0,0518 \text{ МПа.}$$

Погрешность результата анализа $\bar{E}_{g(m)}$ с надежностью $\alpha = 0,95$ составляет (см. [16]):

$$\kappa = \pm \frac{T\alpha_m \cdot S_m}{\sqrt{m}} = \pm \frac{2,57 \cdot 0,0518}{\sqrt{6}} = \pm 0,054 \text{ МПа,}$$

где $T\alpha_m = 2,57$ - квантиль распределения Стьюдента находится по таблице 1 справочника [16] для $\alpha = 0,95$ и числа годных определений $m=6$, выполненных при анализе. Результаты вычислений означают, что с вероятностью 95% истинное значение модуля упругости E_g рассматриваемой резины лежит в пределах от $\bar{E}_{g(m)} - |\kappa|$ до $\bar{E}_{g(m)} + |\kappa|$, то есть

$$E_g = \bar{E}_{g(m)} \pm |\kappa| = (4,400 \pm 0,054) \text{ МПа.}$$

Точность (воспроизводимость) метода характеризуется коэффициентом вариации v_m . Коэффициент вариации представляет собой относительную среднеквадратическую погрешность (отклонение) и равен отношению среднеквадратической погрешности отдельного измерения к среднему значению $\bar{E}_{g(m)}$:

$$v_m = \frac{S_m}{\bar{E}_{g(m)}} = \frac{0,0518}{4,400} = 1,18 \cdot 10^{-2}.$$

Поскольку в нашем случае коэффициент вариации $v_m = 1,18 \cdot 10^{-2} \ll 0,33$, то рассматриваемая совокупность аналитических данных (см. Таблицу 6) подчиняется нормальному закону.

Следует особо отметить, что так называемый 300%-ный модуль M , используемый в резиновой промышленности для контроля качества резиновой смеси, может иметь некоторое отношение к модулю упругости E_g или вовсе не иметь к нему никакого отношения. Величина M , конечно, не является модулем в том смысле, в котором это понятие используется в механике. Скорее модуль M это напряжение, имеющее ту же размерность, что и модуль упругости E_g , требуемое для создания 300%-ного удлинения при одноосном растяжении. Относительное удлинение в 300% и более возникает

крайне редко (если вообще возникает) в элементах шины при эксплуатации, то есть 300%-ный модуль M вообще не требуется для характеристики констант упругости резинокордной системы.

Итак, мы определили модуль упругости резины 2и8338 и обработали результаты эксперимента методами математической статистики. Все шаги в данном случае в качестве примера описаны предельно подробно.

Как известно, растяжение призматического образца из упругого материала в продольном направлении сопровождается пропорциональным сжатием в двух других поперечных направлениях. Коэффициент пропорциональности деформации поперечного сжатия заданной деформации продольного растяжения называется коэффициентом Пуассона [17, с. 27]. Коэффициент Пуассона равен:

$$\nu_g = \frac{|\varepsilon'|}{\varepsilon}, \quad (3)$$

где ε - деформация продольного растяжения образца, а ε' - деформация поперечного сжатия. Известно, что для различных изотропных материалов коэффициент Пуассона ν лежит в пределах $0 \leq \nu \leq 0,5$. В нашем случае с целью определения коэффициента Пуассона ν_g для резины шифра 2и8338 были проведены дополнительные замеры ширины b^* образцов, подверженных растяжению усилием $N=12$ Н. Замеры проводились калиброммером с индикаторной головкой класса 0,01 мм. Продольные деформации взяты из диаграммы растяжения образцов. В соответствии с экспериментальными данными были определены поперечные деформации по формуле

$$\varepsilon' = -\Delta b / b,$$

где $\Delta b = b^* - b$ - изменение ширины образца. Наконец, по формуле (3) были рассчитаны коэффициенты Пуассона и границы, в которых с вероятностью 95% лежит истинное значение коэффициента Пуассона для данной резины:

$$\nu_g = 0,490 \pm 0,003.$$

При этом коэффициент вариации $\nu_{in} = 0,006$. Полученные цифры характеризуют высокую точность и воспроизводимость примененного метода, а также то, что резина близка к несжимаемому материалу, для которого $\nu = 0,5$.

Как известно [см. 17], константы упругости E и ν используются в законе Гука для изотропных материалов, определяя связь деформаций $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$ с напряжениями $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)], & \gamma_{xy} &= \frac{2(1+\nu)}{E} \cdot \tau_{xy}, \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)], & \gamma_{yz} &= \frac{2(1+\nu)}{E} \cdot \tau_{yz}, \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)], & \gamma_{zx} &= \frac{2(1+\nu)}{E} \cdot \tau_{zx}. \end{aligned} \quad (4)$$

В случае плоского напряженного состояния, которое практически реализуется в большинстве участков шины, напряжения $\sigma_x, \sigma_{xz}, \sigma_{yz}$ близки к нулю. Поэтому для резины в этом случае имеем более простые зависимости:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E_g} \cdot (\sigma_x - \nu_g \sigma_y), & \varepsilon_y &= \frac{1}{E_g} \cdot (\sigma_y - \nu_g \sigma_x), \\ \varepsilon_{xy} &= \sigma_{xy} / G_g, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\text{где } G_g = \frac{E_g}{2(1+\nu_g)}. \quad (6)$$

Итак, здесь предложена методология экспериментального исследования упругих свойств шинных резин. Установлено, что резину при деформациях, которые реально возникают в шине, можно рассматривать как линейно упругий изотропный конструкционный материал.

По данным измерений при лабораторных испытаниях на растяжение образцов резины получено, с помощью метода наименьших квадратов, линейное уравнение регрессии, описывающее с точностью $1.18 \cdot 10^{-2}$ при надежности 0.95 связь между усилием, возникающим в резине, и деформацией. Выведены формулы для расчета по экспериментальным данным модуля упругости и коэффициента Пуассона резины.

Записаны для плоского напряженного состояния, которое реально возникает в шинных резинах, уравнения обобщенного закона Гука, устанавливающего связь между деформациями и напряжениями.

ЛИТЕРАТУРА

1. R.J. Brown, et al... Rubber World 145(2), 70 (1961); Rubber Chem. And Tech. 35(2), 546 (1962).
2. D.V. Sarbach, R.W. Hallman and M.A. Cavicchia. Rubber Age 90(11), 67 (1966).
3. C.J. Kochmit. Changing trends in tread type carbon blacks. Paper presented at meeting of the ACS Division of Rubber Chemistry, Cleveland, Ohio, April 23-26, 1968; Abstract in Rubber Age 100(3), 79 (1968).

4. R.M. Vance and K.A. Burgess. Laboratory tire groove cracking test, Paper presented at meeting of ACS Division of Rubber Chemistry, Cleveland, Ohio, April 23-26, 1968; Rubber Chem. And Technol. 41(4), 1080 (1968).
5. P.W. Allen. Rubber Developments, 28, # 1, 2, 1975.
6. Williams, Landel and Ferry. J. Am. Chem. Soc. 77, 3701, 1955.
7. Дж. Ферри. Вязкоупругие свойства полимеров. Издательский центр МГУ, М., 1964.
8. L. Mullins. Rub. Chem. And Tech., 21, 281, 1948.
9. A.R. Payne, R.E. Whittaker. Rub. Chem. And Tech., 44, 440, 1971.
10. E. Samuel, K. Clark. Mechanics of Pneumatic Tires. Washington, USA, 1981, Chapter 10.
11. S.D. Gehman. Rub. Chem. And Tech., 30, 1202, 1957.
12. M.L. Studebaker and J.R. Beatty. Rub. Chem. And Tech., 47, 803, 1974.
13. В.Л.Гончаров. Теория интерполирования и приближения функций. ГИИТЛ-М.: 1954, 327 с.
14. Э.С. Маркович. Курс высшей математики с элементами теории вероятностей и математической статистики. Изд-во "Высшая школа".- М.:1972.480с.
15. А.Ф. Смирнов. Сопротивление материалов. М.: Трансжелдориздат. 1961, с.197-200, 231-233.
16. Р.И. Алексеев, Ю.И.Коровин. Руководство по вычислению и обработке результатов количественного анализа. Атомиздат, -М.:1972.72с..
17. С.П.Тимошенко, Дж.Гудьер. Теория упругости, перевод с англ.. Главн. редакция физ.-мат. литературы изд-ва "Наука".-М.:1975, 576с.