ИСХОДНЫЙ И ОСТАТОЧНЫЙ РЕСУРС РЕЗИНОКОРДНЫХ ОБОЛОЧЕК СОЕДИНИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ПОДВИЖНОГО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО СОСТАВА

Евдокимов Алексей Петрович,
доктор технических наук, ведущий научный сотрудник,
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН

INITIAL AND RESIDUAL RESOURCE OF RUBBER-CORD SHELLS OF CONNECTING DEVICES OF ROLLING STOCK

Alexey Petrovich Evdokimov,
Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher,
A. A. Blagonravov Institute of Mechanical Engineering of
B. the Russian Academy of Sciences

Аннотация. В статье приведены основные расчётные зависимости ресурса резинокордных оболочек на основе полученных результатов экспериментальных исследований интегральных характеристик с учётом квазиупругой, неупругой и суммарной деформации. Построены графики зависимости долговечности оболочек от угла закручивания и указанных видов деформации.

The summary. In article the basic settlement dependences of a resource of rubber-cord environments are given on the basis of the received results of experimental researches of integrated characteristics in view of quasi-elastic, not elastic and total deformation. Diagrams of dependence of durability of environments from a corner of a twisting and the specified kinds of deformation are constructed.

Ключевые слова: силовые приводы, интегральные характеристики, петли гистерезиса, упругая податливость, ресурс.

Key words: force drives, integrated characteristics, loops of a hysteresis, an elastic pliability, a resource.

Резинокордные оболочки (РКО) с соответствующими физико-механическими характеристиками, определяющими их демпфирующую способность, являются упругими элементами соединительных устройств подвижного железнодорожного состава. Использование таких муфт позволило в значительной степени снизить уровень крутильных колебаний. Демпфирующую способность РКО определяют по результатам экспериментальных исследований интегральных характеристик.

Наглядное представление о нелинейной связи нагрузка-деформация дают гистерезисные петли, получаемые при испытаниях высокоэластичных материалов. Как известно, площадь петли гистерезиса измеряет ту часть энергии, которая необратимо поглощается при деформации таких материалов и переходит преимущественно в тепло. В общем виде функция источника тепла, определяемая усреднённой за цикл суммарной величиной рассеиваемой энергии, можно представить в виде [1, 2]

$$W = \frac{G_0 \omega \psi A^2}{2\pi} f(x, y, z), \quad (1)$$

где $f(x, y, z)$ – функция зависимости нагружение – деформация, ψ – коэффициент поглощения энергии, ω – собственная частота колебаний, A – амплитуда затухающих колебаний.

Это является основанием для предварительного выяснения характера крутильных колебаний системы с РКО. Вначале допускают, что эти колебания вызывают в оболочках настолько малые деформации, что податливость их может быть оценена как первая производная от деформации e по вызывающему её скручивающему моменту M : [3]

$$e \approx (e)_{F \rightarrow 0} = \frac{d\phi}{dM}, \quad (2)$$

где F – амплитуда эластического момента.

РКО в большинстве случаев передают, кроме крутильных колебаний, также некоторый средний крутящий момент M^{cp} , вызывающий в муфтах противодействующий ему средний эластический момент U^{cp} . Величина этого момента часто непостоянна и зависит от условий эксплуатации. Это обстоятельство обуславливает также и в случае малых колебаний непостоянство податливости РКО: с увеличением частоты вращения повышается средний крутящий момент, а с ним перемещается и та точка на кривой $U = f(\phi)$, наклон касательной, в которой

по отношению к оси ординат определяет исследуемую податливость.

Таким образом, для определения податливости РКО необходимо располагать так называемой характеристикой зависимости между её деформацией и передаваемым скручивающим (эластическим) моментом. Принято в данном случае осуществлять статическое нагружение оболочек, которое предполагает скорость приложения нагрузки, превышающей скорости протекания релаксационных процессов в полимерах. Такие режимы нагружения позволяют определить зависимости упруго-демпфирующих свойств оболочек от температуры и времени приложения нагрузки.

По результатам экспериментов с оболочкой ЭМ320×80 были построены петли гистерезиса, полученные при испытаниях на кручение (рис. 1, а), на сдвиг (рис. 1, б) и на сжатие (рис. 1, в).

а)

б)

в)

Рис. 1. Петли гистерезиса при испытаниях: а - на кручение, б- на сдвиг, в- на сжатие.

При нагружении статическим крутящим моментом $M_{кр}^{ст} = 1370 \text{ Н} \cdot \text{м}$ площадь петли гистерезиса имела сравнительно высокую величину. Максимальный угол закручивания оболочки достигал 0,12 рад. Крутильная жёсткость составила 16000 Н·м/рад.

В случае поперечного сдвига ($S = 5 \text{ мм}$) при усилии 1120 Н относительная ширина петли гистерезиса в этом случае имела меньшее значение ($\Delta \bar{S} = \frac{3-2}{5} = 0,2$) по сравнению с кручением ($\Delta \bar{\phi} = \frac{0,076 - 0,05}{0,12} = 0,216$), что давало и меньшую площадь петли. Радиальная жёсткость оболочки была равна 32 Н/м.

При осевом нагружении $P = 3000 \text{ Н}$ оболочка имела смещение 25 мм. Осевая жёсткость при этом составила 10,3 Н/м. Относительная ширина $l = \frac{15 - 10}{25} = 0,2$ и площадь петли гистерезиса принимали такое же значение, как и при поперечном сдвиге.

Этот вид испытаний позволил также определить при кручении демпфирующую способность испытуемых узлов, которая оценивалась коэффициентом поглощения энергии ψ , равным отношению потерянной за цикл энергии Ψ к наибольшему значению потенциальной энергии Π оболочки [4]:

$$\psi = \Psi / \Pi, \quad (3)$$

где $\Psi = \int_0^T b_2 \dot{\phi}^2(t) dt = b_2 (\phi \omega)^2 \int_0^T \sin^2 \omega t dt = \pi \phi^2 \omega b_2$, $\Pi = c\phi^2/2$, $T = 2\pi/\omega$ – период демпфирования, b_2 – константа, $c = tg \alpha$ – угол наклона петли гистерезиса, который характеризует жёсткость РКО.

В результате вычислений получен коэффициент поглощения $\psi = 0,47$.

Данные по сопротивлению статическим деформациям при однократном нагружении указывает на существенную нелинейность интегральных характеристик, определяющих связь между крутящими моментами и угловыми перемещениями. В свою очередь эти усилия и перемещения порождают радиальные и осевые смещения, а их общая комбинация определяет зоны накопления повреждений и разрушений. Реальные условия нагружения РКО требуют перехода к анализу не только циклических, но и термоциклических процессов деформирования и разрушения.

Принято, подбор РКО осуществлять из имеющейся номенклатуры их типоразмеров по номинальному крутящему моменту. При этом используются расчётные зависимости крутильных колебаний с учётом крутильной жёсткости оболочек, полученных в результате экспериментальных исследований, представленных в виде петель гистерезиса, при нагружении статическим крутящим моментом.

Однако такая методика расчёта не позволяет определить ресурс оболочек. Долговечность РКО в значительной степени определяется углом закручивания. Нормативные значения крутящих моментов и статистические данные экспериментальных исследований при статическом нагружении позволили определить номинальные и максимальные значения углов закручивания оболочек.

Рис. 2. Зависимость угла закручивания (1) РКО от номинального крутящего момента (2).

С увеличением типоразмера РКО угол закручивания возрастает (рис. 2). Снижение значения угла закручивания происходит на оболочке ЭМ520×150 в связи с её конструктивными особенностями (наличие М – образной формы наружной поверхности и дополнительного слоя корда в виде кольца в зоне экватора оболочки).

Используя статистические данные выхода из строя РКО, можно в первом приближении определить их ресурс в зависимости от угла закручивания по степенному уравнению долговечности,

$$\phi N^m = c, \quad (4)$$

где ϕ – угол закручивания оболочки,

N – долговечность оболочки.

m, c – параметры оболочки.

Для их определения используются условия разрушения в крайних точках:

при $N = 1$ максимальный угол закручивания РКО ЭМ320×80 $\phi = 0,18$;

при $N = 10^6$ предельный угол закручивания РКО ЭМ320×80 $\phi = 0,062$.

Тогда расчётная долговечность будет

$$N = \left(\frac{c}{\phi} \right)^{\frac{1}{m}}, \quad (5)$$

где $m = 0,077, c = 0,18$.

Испытания показали, что ресурс РКО отличается от расчётного по (5). Это отличие для различных вариантов использования оболочек показано на рис. 3. Заметное снижение долговечности происходит в диапазонах от 10^2 до 10^4 циклов.

Рис. 3. Зависимости ресурса от угла закручивания РКО по числу возникновения дефектов.

При статическом и циклическом нагружении оболочек возникают петли гистерезиса (а, рис. 4), связывающие усилия (моменты или продольные силы) с деформациями (углы закручивания или осевые смещения). Эти деформации можно разделить на квазиупругие (линия б) с размахом $\Delta\phi_{ку}$ и неупругие с размахом $\Delta\phi_{н}$. Эти размахи соответствуют удвоенной амплитудам $\phi_{куа}$ и $\phi_{на}$.

Рис. 4. Интегральные характеристики РКО: а – петля гистерезиса; б – квазиупругая деформация; $\Delta\phi_{ку}$ – размах квазиупругой деформации; $\Delta\phi_{н}$ – размах неупругой деформации.

Принимая по аналогии с металлическими материалами справедливой степенную зависимость (4) для каждой из составляющих от этой деформации, можно установить зависимость ресурса РКО от величины квазиупругой и неупругой деформации. Определение этих величин осуществлялось на основе (4) и (5) по зависимостям Коффина-Мэнсона, модифицированным в Институте машиноведения им. А.А. Благонравова РАН [5-7]:

амплитуда квазиупругой деформации

$$\phi_{куа} = \frac{C_{ку}}{2 N^{m_{ку}}}, \quad (6)$$

амплитуда неупругой деформации

$$\phi_{на} = \frac{C_{н}}{2 N^{m_{н}}}, \quad (7)$$

суммарная амплитуда деформации

$$\phi_a = \frac{C_{ку}}{2 N^{m_{ку}}} + \frac{C_{н}}{2 N^{m_{н}}}. \quad (8)$$

Расчётные параметры выражений (6) – (8) приведены в таблице.

Таблица.

Расчётные параметры резинокордных оболочек

Параметры	Типоразмер оболочки				
	ЭМ320×80	ЭМ360×100	ЭМ400×100	ЭМ520×150	ЭМ580×130
C_{kv}	0,18	0,21	0,22	0,14	0,27
C_n	0,045	0,048	0,052	0,03	0,065
m_{kv}	0,564	0,489	0,464	0,811	0,38
m_n	1,877	1,768	1,565	3,071	1,513

Результаты вычислений по (6) – (8) также приведены на рис. 5: при квазиупругой деформации резинокордная оболочка ЭМ320×80 имеет долговечность 10^7 циклов (рис. 5, а); в случае неупругой деформации – 10^5 циклов.

а)

б)

в)

Рис. 5. Зависимость долговечности РКО от величины квазиупругой (1), неупругой (2) и суммарной (3) деформации РКО: а – ЭМ320×80; б – ЭМ580×130; в – ЭМ520×150.

Долговечность РКО ЭМ580×130 определяется квазиупругой деформацией 10^7 циклов, неупругой деформацией – 10^5 циклов (рис. 5, б).

Для оболочки ЭМ520×150 (рис. 5, в) долговечность имеет 10^8 циклов в случае квазиупругой деформации, 10^2 циклов при неупругой деформации, порядка 0,01.

Выводы

1. Данные по сопротивлению статическим деформациям при однократном нагружении указывает на существенную нелинейность интегральных характеристик, определяющих связь между крутящими моментами и угловыми перемещениями. В свою очередь эти усилия и перемещения порождают радиальные и осевые смещения. Реальные условия нагружения РКО требуют перехода к анализу не только циклических, но и термоциклических процессов деформирования и разрушения.

2. Выведенные уравнения позволяют определить ресурс РКО с позиции квазиупругой, неупругой и суммарной деформации. При этом необходимо располагать статистическими данными выхода из строя оболочек и интегральными характеристиками. Данный метод расчёта может быть использован и на другие виды упругих элементов, находящихся в различных условиях эксплуатации.

Список литературы

1. Вейц В.Л. Колебательные системы машинных агрегатов. - Л.: Машиностроение, - 1979. 256 с.
2. Вейц В.Л. Динамика машинных агрегатов с двигателями внутреннего сгорания. - Л.: М.: Машиностроение, - 1976. 336 с.
3. Пановко Г.Я. Внутреннее трение при колебаниях упругих систем. - М.: Физматгиз, - 1960. 312 с.
4. Поляков В.С., Барбаш И.Д., Ряховский О.А. Справочник по муфтам. - Л.: Машиностроение, - 1979. 343 с.
5. Махутов Н.А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность. Ч. 1. 494 с. Ч. 2. 610 с. Новосибирск, «Наука». 2005г.
6. Махутов Н.А., Матвиенко Ю.Г., Романов А.Н. Проблемы прочности, техногенной безопасности и конструкционного материаловедения. М.:ЛЕНАНД, 2018. 720 с.
7. Махутов Н.А. Деформационные критерии разрушения и расчёт элементов конструкций на прочность. - М.: Машиностроение, - 1981. 272 с.

List of literature

1. Veits V. L. Vibrational systems of machine units. - L.: Mashinostroenie, - 1979. 256 p.
2. Veits V. L. Dynamics of machine units with internal combustion engines. - L.: М.: Mashinostroenie, - 1976. 336 p.
3. Panovko G. Ya. Internal friction during vibrations of elastic systems. - M.: Fizmatgiz, - 1960. 312 p.
4. Polyakov V. S., Barbash I. D., Ryakhovsky O. A. Handbook of couplings. - L.: Mashinostroenie, - 1979. 343 p.
5. Makhutov N. A. Structural strength, resource and technogenic safety. Ch. 1. 494 p. Ch. 2. 610 p. Novosibirsk, "Science". 2005.
6. Makhutov N. A., Matvienko Yu. G., Romanov A. N. Problems of strength, technogenic safety and structural materials science. Moscow: LENAND, 2018. 720 p.
7. Makhutov N. A. Deformation criteria of destruction and calculation of structural elements for strength. - M.: Mashinostroenie, - 1981. 272 p.