

УДК 621.01

С.Н. Яковлев

ДОЛГОВЕЧНОСТЬ МАССИВНЫХ ПОЛИУРЕТАНОВЫХ ШИН

В современном машиностроении актуален вопрос замены традиционного эластомера – резины на более совершенный современный материал – полиуретан для улучшения конструктивных, технологических и эксплуатационных качеств деталей. Перспективность полиуретанов для современной промышленности обусловлена тем, что их свойства существенно дополняют возможности использования других эластомеров, каучуков, резин и пр. По своим конструкционным и технологическим возможностям полиуретаны – наиболее универсальный полимерный материал. Полиуретан характеризуется высокими физико-механическими свойствами, имеет большой диапазон твердости, эластичности, низкую истираемость, высокую прочность, высокое сопротивление раздиру, маслобензостойкость, кислотостойкость и рабочий температурный интервал от -35°C до $+75^{\circ}\text{C}$.

В настоящее время долговечность полиуретановых деталей оценивают в подавляющем большинстве случаев по данным натурных или стендовых испытаний. Однако дороговизна и длительность натурных испытаний, а также отсутствие надежной корреляции между результатами стендовых испытаний и реальной долговечностью полиуретановых деталей вынуждает к поиску инженерного метода расчета срока их службы.

Проблема долговечности массивных шин на сегодняшний день изучается по трем относительно независимым направлениям:

1. Феноменологическое изучение усталостной прочности и разработка методов сравнительных испытаний материалов с целью определения продолжительности их работы в изделиях.

2. Физико-химическое исследование молекулярного механизма утомления.

3. Изыскание эффективных методов повышения усталостной прочности и износостойкости материалов.

Наибольшее практическое значение согласно [1] имеют исследования в третьем направлении, которые могут быть плодотворными, только если они основываются на достаточно надежных представлениях о механизме утомления.

Долговечность полиуретановых деталей машин, в основном, определяется условиями нагружения. В зависимости от условий работы полиуретановые детали можно разбить на две группы:

1. детали, испытывающие статические нагрузки и редкие динамические;

2. детали, испытывающие постоянные динамические нагрузки.

Долговечность деталей 1-й группы согласно [2] в основном определяют процессы старения

полиуретана и вопросы культуры эксплуатации полиуретановых деталей. Главным проявлением эффекта старения является образование на несопрягаемых поверхностях полиуретановых деталей сетки волосяных трещин. В частности для массивных шин несопрягаемыми поверхностями являются торцы упругого обода. В настоящее время [3] установлено, что в атмосферных условиях вызывается озоном, который диффундирует к поверхности земли из стратосферы, где озон образуется из кислорода под действием ультрафиолетовых лучей. Озон неустойчив, распадается на солнечном свету и абсорбируется различными телами, в частности эластомерными материалами.

Волосяные трещины на окисленных торцевых поверхностях массивных шин вследствие деформации упругого обода подвергаются растрескиванию и растут по мере эксплуатации.

Долговечность деталей 1-й группы достаточно высока и составляет 2...3 года, если ранее не происходит нарушение целостности упругого обода из-за порезов и вырывов.

Следует указать, что до сих пор не имеется вполне удовлетворительного метода защиты полиуретана от действия озона, и влияния озона на растрескивания на усталостную выносливость полиуретановых деталей.

Долговечность деталей 2-й группы определяется динамической усталостью или утомление полиуретана под действием постоянных динамических нагрузок. Усталость в широком смысле слова означает изменение свойств материала или его структуры, происходящее при определенном внешнем нагружении за конечный промежуток времени.

В настоящее время процесс разрушения полиуретана согласно [4] рассматривается как кинетический термофлуктуационный процесс постепенного накопления нарушений, который развивается в теле с момента первоначального приложения нагрузки до его разрушения. Элементарными актами процесса разрушения, согласно этим представлениям, являются термофлуктуационные разрывы межатомных связей (химических и межмолекулярных), активируемые приложенным напряжением. Исходя из подобной кинетической концепции, разрушение и прочностные свойства полиуретана следует характеризовать не каким-либо критическим напряжением, а некоторой скоростью накопления разрывов межатомных связей. Согласно критерию Бейли [5], скорость изменения прочности полиуретана в процессе утомления циклической нагрузкой одного вида принимается постоянной. Поэтому в последнее время изучение прочностных свойств полиуретана при динамиче-

ском нагружении сводится к рассмотрению температурно-силовых зависимостей долговечности.

Долговечность массивных полиуретановых шин при динамическом нагружении [6] в сильнейшей степени зависит от повышения температуры вследствие упругого гистерезиса. Поэтому при испытании материала стремится точнее воспроизвести механический режим нагружения (линейная скорость и величина относительной деформации), который в конечном счете определяет температуру полиуретанового обода.

В простейшем случае гармонического нагружения при асимметричном цикле нагружения, когда коэффициент асимметрии цикла

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = 0$$

механический режим нагружения исчерпывающе описывается двумя параметрами: величиной относительной деформации ε и линейной скоростью V экспериментального ролика в контакте с беговым барабаном.

Для экспериментального изучения долговечности использовались ролики диаметром 46 мм, шириной 20 мм, толщиной упругого обода 8 мм трех твердостей: 75 ShA, 85 ShA и 95 ShA.

Важнейшей задачей усталостных испытаний является экспериментальное определение зависимости между выносливостью (количество циклов нагружения до разрушения) и режимом нагружения экспериментального ролика. В связи с определенным рассеянием долговечности (количество часов до разрушения), испытание одного ролика на данном уровне нагружения является недостаточным, поэтому на одном уровне испытывается несколько роликов. Такая последовательность повторения простых испытаний называется многократным испытанием.

Результаты испытаний представляются парой чисел ε , N , которые обеспечивают более точное значение среднего или медианы, кроме того, такие испытания дают возможность получить среднюю характеристику рассеяния, которая обычно изменяется средним квадратичным отклонением, а когда количество испытываемых роликов на каждом уровне нагружения достаточно велико, то можно получить статистическое распределение долговечности.

Так как усталостные испытания стоят достаточно дорого и требуют много времени, желательно чтобы планирование серии испытаний ориентировалось на получение максимальных сведений при наименьших затратах. С этой целью необходимо применять эффективные статистические методы с полным использованием данных, полученных в результате испытаний.

Исходя из опыта статистической обработки результатов циклических усталостных испытаний резин [7], было принято решение для одного уровня деформации испытывать 12 роликов.

Полученные в результате испытаний экспериментальные значения числа циклов нагружения до разрушения роликов наносили на логарифмически нормальную вероятностную бумагу. По оси абсцисс в логарифмическом масштабе откладывали в возрастающем порядке долговечность роликов при циклическом нагружении. Ординаты точек подсчитывали по формуле Вейбулла [8], и для сравнения по формуле Хальда [9].

В результате сравнения приходим к выводу, что для оценки вероятности разрушения при построении функций распределения логарифмов долговечностей следует рекомендовать формулу Хальда, дающую меньшую систематическую ошибку в сравнении с формулой Вейбулла.

По результатам испытаний получена зависимость между числом циклов нагружения до разрушения N и относительной деформацией упругого обода ε

$$N \cdot \varepsilon^m = C, \quad (1)$$

где C – величина постоянная для полиуретана данной твердости и определенной линейной скорости в контакте массивной шины с опорной поверхностью, $m = 0,02ShA^{1,26}$, ShA – твердость полиуретана в единицах по Шору.

Зависимость выносливости полиуретанов различной твердости от относительной деформации ε для линейной скорости $V_l = 1$ м/с в системе координат $\lg \varepsilon - \lg N$ представлена на рис. 1

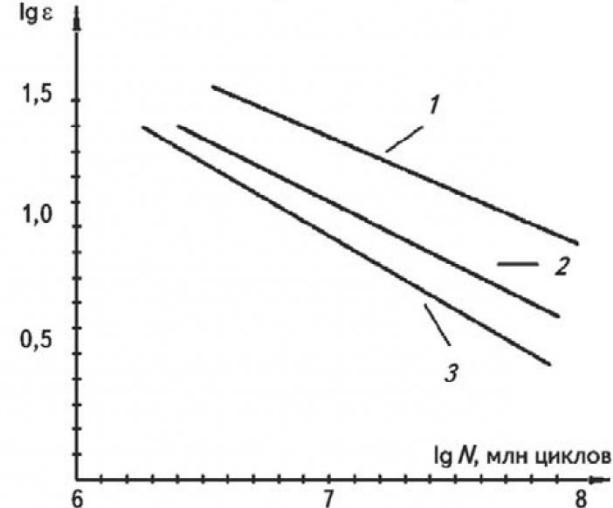


Рис. 1. Зависимость выносливости полиуретанов различной твердости от величины относительной деформации при линейной скорости $V_l = 1$ м/с: 1 - 75 ShA, 2 - 85 ShA, 3 - 95 ShA

Выражение (1) подобно качественно выражению для определения выносливости резин, полученному Резниковским [10] [11].

Величина с правой части выражения (1) в зависимости от твердости и скорости нагружения выглядит следующим образом:

$$C = \frac{10 \cdot (345 - 2,05ShA)}{1 + 0,12 \cdot V_{\text{н}}^{0,78}}.$$

Зависимость выносливости полиуретана различной твердости от скорости нагружения представлена на рис. 2.

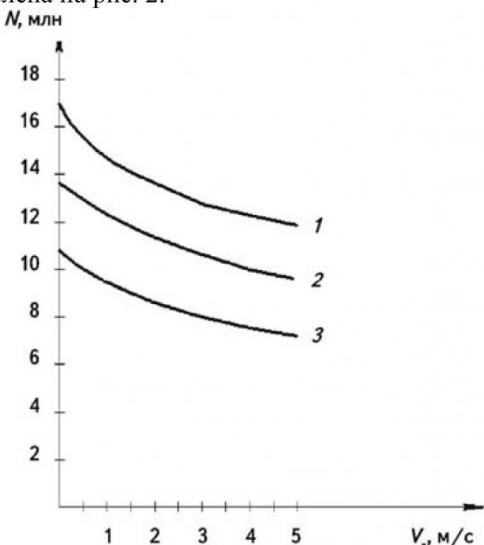


Рис. 2. Зависимость выносливости массивной шины от скорости нагружения:
1 - 75 ShA, 2 - 85 ShA, 3 - 95 ShA

Из рис. 2 следует падение выносливости материала с увеличением скорости нагружения. Это обусловлено ростом температуры полиуретанового массива и как следствие ростом скорости разрушения материала, которая и определяет в конечном итоге [12] долговечность полиуретана.

В развернутом виде зависимость (1) будет выглядеть следующим образом:

$$N \cdot \varepsilon^m = \frac{10 \cdot (345 - 2,05ShA)}{1 + 0,12 \cdot V_{\text{н}}^{0,78}}, \quad (2)$$

откуда выносливость

$$N = \frac{10 \cdot (345 - 2,05ShA)}{(1 + 0,12 \cdot V_{\text{н}}^{0,78}) \cdot \varepsilon^{0,02ShA^{1,26}}} \cdot 10^6 \quad (3)$$

где

$$\varepsilon = 100 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{F}{2 \cdot E_{\text{дин}} \cdot b \cdot d \cdot \sqrt{\frac{h}{d}}} \right)^2} \text{ в \%}$$

Число нагружений массивной шины за 1 час работы равно:

$$N_{\text{час}} = 3600 \cdot \frac{1000 \cdot V_{\text{н}}}{\pi \cdot d} = \frac{3,6 \cdot 10^6 \cdot V_{\text{н}}}{\pi \cdot d} \quad (4)$$

Долговечность или срок службы массивной шины в часах определим по формуле:

$$L = \frac{N}{N_{\text{час}}} = \frac{10(345 - 2,05ShA) \cdot \pi \cdot d \cdot 10^6}{3,6 \cdot 10^6 (1 + 0,12V_{\text{н}}^{0,78}) \cdot \varepsilon^{0,02ShA^{1,26}}} = \\ = \frac{2,78 \cdot (345 - 2,05ShA) \cdot \pi \cdot d}{(1 + 0,12V_{\text{н}}^{0,78}) \cdot \varepsilon^{0,02ShA^{1,26}}} \quad (5)$$

где

$$\varepsilon = 100 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{F}{2 \cdot E_{\text{дин}} \cdot b \cdot d \cdot \sqrt{\frac{h}{d}}} \right)^2}, \text{ в \%}.$$

F - нагрузка на колесо, Н;

$E_{\text{дин}}$ - динамический модуль упругости изделия при сжатии, МПа;

b - ширина обода, мм;

d - диаметр колеса, мм;

h - толщина обода, мм;

ShA - твердость полиуретана в единицах по Шору;

В заключение следует отметить, что полученные выражения для определения долговечности колес с упругим ободом из полиуретана в зависимости от величины относительной деформации и линейной скорости нагружения справедлива для режима постоянного динамического нагружения. Потому что только при постоянном режиме работы происходит нагрев полиуретанового обода, который и определяет скорость деструкции материала.

На сегодняшний день основным критерием, определяющим долговечность массивной шины, является износ обода при качении с проскальзыванием. Предельно допускаемый износ составляет 20...25 % толщины упругого обода. По достижении величины предельно установленного износа производится замена массивной шины на новую. Средняя долговечность массивных шин основных мировых производителей составляет примерно 2500...3000 часов.

В том случае, если массивная шина испытывает нагружение с длительными перерывами, процесс разрушения по своему характеру будет приближаться к старению, который свойственен для деталей 1-й группы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зуев, Ю.С. Перспективные пути улучшения рабочих свойств эластичных материалов / Ю.С. Зуев //Каучук и резина. – 1997. - № 5. – С. 16-21
2. Зуев, Ю.С. Стойкость эластомеров в эксплуатационных условиях /Ю.С. Зуев, Т.Г. Дегтева. – М. : Химия, - 1986. – 262с.

3. Бартенев, Г.М. Прочность и разрушение высокоэластичных материалов / Г.М. Бартенев, Ю.С. Зуев. – М.: Химия, 1964. - 387с.
4. Гуль, В.Е. Структура и механические свойства полимеров / В.Е. Гуль, В.Н. Кулезнов. – М. : Высшая школа, 1972. – 320с.
5. Baily, J. Class Ind., 20, № 1,21 (1939); № 2,59 (1939); № 3, 95 (1939); № 4, 143 (1939); Ceram Abs., 19, № 4, 89 (1940)
6. Диллон, И.Х. Усталостные явления в высокополимерах / И.Х. Диллон. – М. : Государственное научно-техническое издательство химической литературы, 1957. – 136с.
7. Горелик, Б. М. Статистическая обработка результатов циклических усталостных испытаний резин / Б.М. Горелик, М.Н. Хотимский // Механика полимеров.- 1969. - № 12. – С. 26-29
8. Вейбулл, В. Усталостные испытания и анализ их результатов / В. Вейбулл. – М.: Машиностроение, 1964. – 269с.
9. Хальд, А. Математическая статистика с техническими приложениями / А. Хальд. – М. : Иностранная литература, - 1956. – 325с.
10. Бакшицкий, М.Н. Длительная прочность полимеров / М.Н. Бакшицкий. - М.: Химия, 1978. - 309с.
11. Резниковский, М.М. Механические испытания каучука и резины / М.М. Резниковский, А.И. Лукомская. – М. : Химия, - 1968. – 489с.
12. Олдырев, П.П. Определение усталостной долговечности пластмасс по температуре саморазогрева / П.П. Олдырев // Механика полимеров. – 1967. - № 1. – С. 111-117

Автор статьи:

Яковлев

Станислав Николаевич,
канд. техн. наук, доцент (Санкт-
Петербургский государственный
политехнический университет),
e-mail: stannik59@mail.ru

УДК 621.822

С.В. Герасименко, М.П. Латышенко

К ПРОБЛЕМЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СРОКА СЛУЖБЫ КОНИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛОВ КАЧЕНИЯ

Подшипниковые узлы с коническими подшипниками находят широкое применение в агрегатах машин и механизмов (редукторы различных типов; коробки перемены передач и трансмиссия транспортных средств; коробки скоростей станков; опоры валов, штампов, прессов, молотов и др.)

Номинальный ресурс подшипника согласно ISO 281:1990 составляет:

$$L_{10} = (C / P)^m, \text{ млн. об} \quad (1)$$

где L_{10} - номинальный ресурс (при надежности 90%) в млн. об.

C – динамическая грузоподъемность подшипника, кН

P – эквивалентная динамическая нагрузка на подшипник, кН

Номинальная долговечность современных высококачественных подшипников может значительно отличаться от реального срока службы в определенных условиях эксплуатации. Конкретный срок службы подшипников зависит от ряда факторов, включая условия смазывания, степень загрязненности, наличие перекосов, правильность монтажа и условия окружающей среды.

Поэтому методика ISO 281:1990/Amd 2:2000 предполагает включение в уравнение номиналь-

ной долговечности (ресурса) подшипника поправочного коэффициента надежности a_1 , значения которого приведены в соответствующих каталогах SKF.

Согласно методике ISO 281:1990/Amd 2:2000 производители подшипников также должны рекомендовать соответствующий метод расчета коэффициента модифицированного ресурса подшипника в зависимости от условий его эксплуатации - коэффициент a_{SKF} . При расчете коэффициента a_{SKF} используется принцип граничной нагрузки по усталостному разрушению. Величины граничной нагрузки по усталости приведены в таблицах подшипников. Кроме того, коэффициент ресурса a_{SKF} учитывает фактические условия смазывания и уровень загрязненности подшипника.

Уравнение ресурса подшипников с учетом этих коэффициентов выглядит как

$$L_{nm} = a_1 a_{SKF} L_{10} \quad (2)$$

Описанные методики расчета ресурса подшипников не учитывают факторы, которые возникают при сборке подшипников, то есть установки колец 3 на вал 2 и в корпус 1 с образованием подшипникового узла (ПУ) (рис. 1).

В работе [1] отмечалось, что при установке наружных колец конических подшипников в кор-