

УДК 629.113.004.67

# ИЗМЕНЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МАНЖЕТНОГО УПЛОТНЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

А.С. ДЕНИСОВ, д.т.н. / И.Г. ИВАНОВ, асп.  
Саратовский ГТУ

При вулканизации резиновой смеси из каучука и различных агентов получается гибкая и подвижная трёхмерная сетчатая структура резины, определяющая способность резины к большим обратным деформациям. Под воздействием внешних условий в резине протекают процессы разрушения и образования новых поперечных связей, приводящие к необратимым изменениям её свойств (старению).

В режиме постоянной деформации, в котором работает большинство уплотнений, протекает непрерывный процесс снижения напряжения до его равновесного значения — релаксация напряжения. Скорость накопления остаточной деформации характеризуется значением относительной остаточной деформации. Время химической релаксации напряжения резин формально подчиняется закону Аррениуса. Чем выше температура, тем меньше время протекания процесса. В процессе эксплуатации уплотнения наблюдается износ вала и губки уплотнения, который описывается дифференциальным уравнением скорости изнашивания.

Одной из основных задач автомобилестроения является повышение надёжности. Наиболее полно эта задача решается при постановке на агрегаты автомобиля качественных деталей. Манжетные уплотнения вращающихся валов установлены на таких важных агрегатах автомобиля, как двигатель, коробка передач,

раздаточная коробка, редукторы ведущих мостов и рулевая колонка. Необходимо отметить, что от надёжности уплотнений напрямую зависит срок службы агрегатов, а их внезапный отказ влечет за собой трудоемкий дорогостоящий ремонт.

В двигателе отказы манжетного уплотнения заднего носка коленчатого вала занимают около 5,3% от общего числа отказов. Несмотря на то, что манжетное уплотнение является дешевой деталью, затраты на устранение его отказов составляют 12% устранения всех отказов в двигателе. Конструкторы современных двигателей постоянно работают над повышением надёжности манжетных уплотнений, о чем позволяет говорить динамика снижения количества отказов за последние годы. Однако полностью эта задача до сих пор не решена.

Ресурс сальников зависит от нагрузочного, скоростного и теплового режимов работы. В зависимости от характера использования агрегата ресурс сальника может измеряться в тысячах километров пробега автомобиля или в тысячах часов работы агрегата. В первом случае ресурс определяется, в основном, процессами изнашивания сопряжения, а во втором — в основном процессами изменения упругих свойств сальника во времени (старение).

При вулканизации резиновой смеси из каучука, вулканизирующих агентов, наполнителей и других ингредиентов возникают поперечные химические связи макромолекул каучука между собой с по-

мощью вулканизирующего агента. Результатом этого является трёхмерная сетчатая структура резины, в которой основные цепи «сшиты» поперечными связями. Участки цепи между связями сохраняют гибкость и подвижность, определяющие способность резины к большим обратным деформациям.

Высокоэластическое состояние является промежуточным состоянием между текучим и стеклообразным. Механические свойства резины в высокоэластическом состоянии имеют элементы, свойственные как жидкому, так и твёрдому телу. Поэтому деформация развивается путём последовательного перемещения сегментов каждого участка, то есть протекает во времени. Между приложением нагрузки и моментом наступления в деформированном материале равновесного состояния проходит достаточно большой отрезок времени. Процессы установления равновесия, временной ход которых определяется перегруппировкой частиц под воздействием теплового движения, являются релаксационными.

В режиме постоянной деформации, в котором работает большинство уплотнений, протекает непрерывный процесс снижения напряжения до его равновесного значения — релаксация напряжения, для описания которого используют экспоненциальное уравнение Хивеленда [1, 3]

$$\sigma_0 = \sigma_0 e^{-at}, \quad (1)$$

где  $\sigma_0$  — исходное напряжение;  $a$  — константа скорости процесса релаксации.

Скорость накопления остаточной деформации характеризуется значением  $H$  относительной остаточной деформации:

$$H = \varepsilon_{ост} / \varepsilon = (h_0 - h_2) / (h_0 - h_\tau), \quad (2)$$

где  $\varepsilon_{ост} = (h_0 - h_2) / h_\tau$  — остаточная деформация;  $h_2$  — высота образца

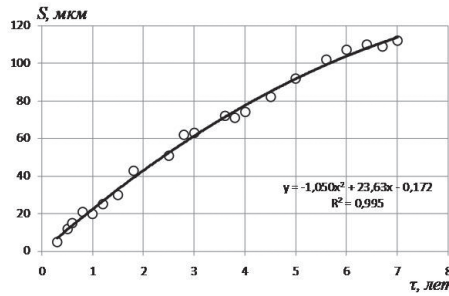


Рисунок 1. Зависимость износа поверхности вала под манжетное уплотнение от наработки

после снятия нагрузки;  $h_0$  — исходная высота образца;  $h_\tau$  — текущее значение высоты образца.

В качестве первого допущения при обосновании формы зависимости  $H$  от  $\tau$  принимаем линейный характер зависимости скорости остаточной деформации  $dH / d\tau$  от напряжения:

$$\frac{dH}{d\tau} = b\sigma, \quad (3)$$

где  $b$  — коэффициент пропорциональности.

С учётом уравнения (1) [1, 3] запишем:

$$\frac{dH}{d\tau} = b \sigma_0 e^{-at}; \quad (4)$$

$$dH = b \sigma_0 e^{-at} d\tau; \quad (5)$$

$$H = \int b \sigma_0 e^{-at} d\tau = -b \sigma_0 \alpha e^{-at} + C_u. \quad (6)$$

Постоянную интегрирования  $C_u$  определим из начальных условий: при  $\tau = 0 \rightarrow H = 0$ , откуда  $C_u = b\sigma_0 a$ , тогда

$$H = b \sigma_0 \alpha - b \alpha \sigma_0 e^{-at} = b \sigma_0 \alpha (1 - e^{-at}). \quad (7)$$

По физическому смыслу  $b\sigma_0 a = H_0$  — относительная остаточная деформация в начале эксплуатации (в конце приработки).

Скорость нарастания остаточной деформации в процессе эксплуатации зависит от температуры. При действии высоких температур на напряжённые резиновые уплотнители резко ускоряются процессы химической релаксации напряжения, накопления остаточной деформации и снижения остаточной эластичности.

Время  $\tau$  химической релаксации напряжения резин формально подчиняется закону Аррениуса [1, 3]

$$\tau = B e^{U/RT}, \quad (8)$$

где  $B$  — константа скорости процесса;  $U$  — энергия активации;  $R$  — постоянная Больцмана;  $T$  — температура.

Чем выше температура, тем меньше время протекания процесса. Это означает, что при этом повыша-

ется скорость нарастания остаточных деформаций и снижается ресурс уплотнения.

В процессе эксплуатации уплотнения наблюдается износ вала и губки уплотнения. Для описания этого процесса составим дифференциальное уравнение скорости изнашивания. В качестве второго допущения примем то, что с ростом износа деталей сопряжения  $S$  линейно снижается и давление в зоне трения, и скорость изнашивания  $v$

$$v_0 = v_0 - bS, \quad (9)$$

где  $v_0$  — скорость изнашивания в конце приработки, приведённая к началу эксплуатации;  $b$  — изменение скорости изнашивания на единицу износа.

Поскольку  $v = dS / dt$ , то решение дифференциального уравнения (9) при начальных условиях:  $S = 0$  при  $t = 0$  даёт уравнение в виде:

$$S = S_0 (1 - e^{-bt}), \quad (10)$$

где  $S_0$  — износ в начале эксплуатации (в конце приработки).

Износ сопряжения и остаточная деформация уплотнения приводят к повышению расхода жидкости через уплотнение, что и ограничивает его ресурс. Сравнивая зависимости (7) и (10), видим, что они имеют одинаковый характер. Следовательно, и расход жидкости через уплотнение в процессе эксплуатации (хранения) возрастает по экспоненциальной затухающей зависимости:

$$Q = Q_0 (1 - e^{-bt}), \quad (11)$$

где  $Q_0$  — расход жидкости в начале эксплуатации (в конце приработки).

Таблица 1. Значения времени работы двигателя и средней температуры уплотнения в зависимости от среднесуточного пробега автомобиля

$l_{cc}$	0	50	100	150	200	250	300	400	500	1000
$d$	0	0,052	0,104	0,156	0,208	0,26	0,313	0,416	0,521	0,83
$t_y$	20	27,3	30,4	35,6	40,8	46	51,3	61,7	72,1	103,4
$H'$	0,35	0,4	0,53	0,7	0,8	1,0	1,2	1,5	1,75	3,5
$\tau$	100	87,5	66	50	43,8	35	29	23	20	10

Примечание:  $l_{cc}$  — среднесуточный пробег автомобиля, км;  $d$  — доля времени работы двигателя в сутки, %;  $t_y$  — средняя температура уплотнения, °C;  $H'$  — средний темп прироста остаточной деформации, % в сутки;  $\tau$  — относительный ресурс уплотнения, %

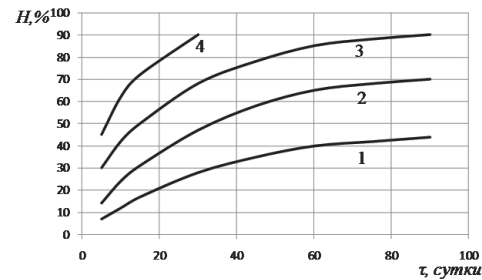


Рисунок 2. Кинетика накопления резиной остаточной деформации при различных температурах: 1 — 50°C; 2 — 70°C; 3 — 90°C; 4 — 110°C

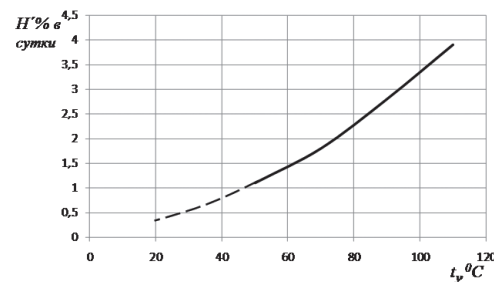


Рисунок 3. Зависимость среднего темпа прироста остаточной деформации резины от температуры уплотнения (по данным рис. 2)

Для проверки зависимости (10) были собраны статистические данные, после обработки которых построен график зависимости износа поверхности вала под манжетное уплотнение от наработки (рис. 1). Из графика видно, что интенсивность изнашивания манжетного уплотнения снижается.

При сложившихся условиях эксплуатации автомобиля в качестве измерителя наработки  $t$  можно использовать пробег  $l$ . Для большинства машин и механизмов допустимая норма утечек рабочей жидкости составляет  $0,5 \text{ см}^3/(\text{м}^2\text{ч})$  [2]. Использование этого значения и обоснованной зависимости (11) позволяет прогнозировать остаточный ресурс уплотнения.

Если принять ресурс уплотнения при неработающем агрегате (режим хранения) за 100%, то при работе агрегата ресурс сокращается вследствие повышения температуры и изнашивания. В конкретных климатических условиях среднюю температуру ра-

боты уплотнения можно определить с учётом интенсивности эксплуатации автомобиля. Если при среднем статистическом режиме работы двигателя температура уплотнения составляет в среднем  $t_p$ , то для средней температуры уплотнения  $t_y$  можно записать

$$t_y = t_c(1 - d) + t_p d, \quad (12)$$

где  $t_c$  — средняя температура окружающей среды;  $d$  — доля времени работы двигателя.

Долю времени работы двигателя можно определить по среднесуточному пробегу автомобиля и средней скорости движения. Так, при среднесуточном пробеге автомобиля 200 км и средней скорости 40 км/ч время работы в сутки составит 5 ч, а доля времени работы двигателя  $5/24 = 0,208$ . При неработающем двигателе (режим хранения) доля времени равна нулю и температура уплотнения равна температуре окружающей среды.

В табл. 1 приведены значения доли времени работы двигателя и средней температуры уплотнения в зависимости от среднесуточного пробега.

Значения параметров уплотнения в зависимости от интенсивности эксплуатации автомобиля (см. таблицу).

Для определения соотношения ресурса уплотнений при различных режимах работы автомобиля использовали данные исследования [1] по кинетике накопления остаточной деформации резиной при различных температурах, которые приведены на рис. 2.

По этим данным была построена зависимость среднего темпа старения (накопления остаточной деформации) от температуры (рис. 3). По аппроксимирующему полиному второй степени было определено значение темпа старения при температуре 20°C. Поскольку ресурс уплотнения обратно пропорционален темпу

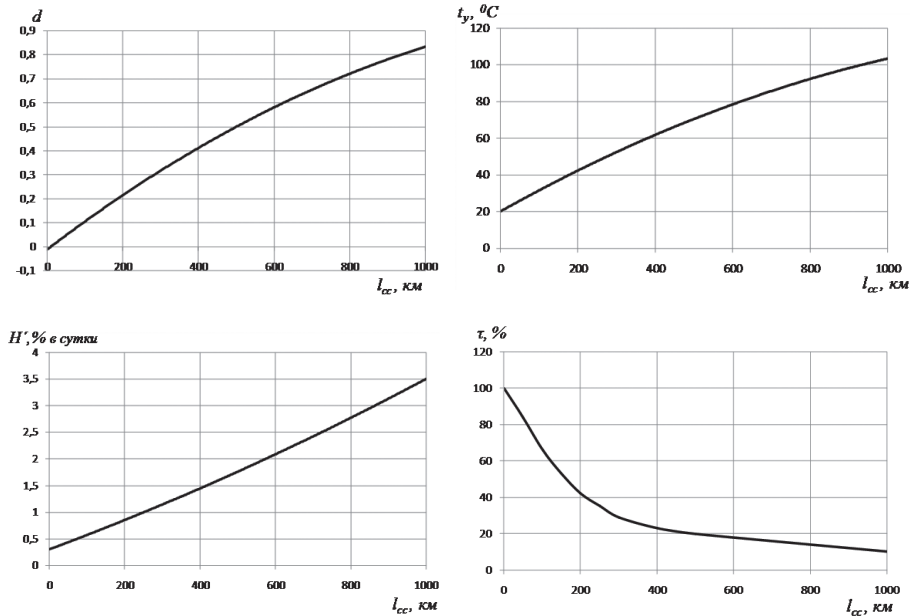


Рисунок 4. Зависимость параметров уплотнения от среднесуточного пробега

старения, то зависимость ресурса от температуры будет убывающей. Это отражено в таблице, где приведены значения относительного ресурса уплотнения. При этом за 100% принят ресурс неработающего уплотнения.

Для промежуточных значений среднесуточного пробега автомобилей при корректировании ресурса уплотнений можно использовать графики, приведённые на рис. 4.

Таким образом, в процессе эксплуатации происходит закономерное изменение технического состояния сальниковых уплотнений вследствие процессов старения и изнашивания. Обоснованы типы зависимостей остаточной деформации, износа сальника от наработки, а также зависимости его ресурса от интенсивности эксплуатации автомобиля.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аврущенко Б.Х. Резиновые уплотнители / Б.Х. Аврущенко. — Л.: «Химия», 1978. — 136 с.
2. Бергштейн Л.А. Лабораторный практикум по технологии резины / Л.А. Бергштейн. — Л.: «Химия», 1989. — 248 с.
3. Браун Д., Шердрон Г., Керн В. Практическое руководство по синтезу и исследованию свойств полимеров / Д. Браун, Г. Шердрон, В. Керн. — М.: «Химия», 1976. — 256 с.