

ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ШАРОВЫХ ОПОР ЛЕГКОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ

Д-р техн. наук, проф. И. И. АРТЕМОВ, ст. препод. А. А. ВОЙНОВ

В рамках модели изнашивания, содержащей ряд безразмерных инвариантов, характеризующих процессы поверхностного разрушения сопряжения «палец-корпус» шаровой опоры автомобиля, разработан и экспериментально подтверждён метод повышения долговечности шаровой опоры.

Within the framework of the deterioration pattern, maintaining a row of the non-dimensional invariants characterizing the superficial breakdown processes of the 'cog-corps' coupling of the ball-bearing the method of the endurance raise of the ball-bearing has-been developed and experimentally proved.

Среди узлов независимой передней подвески легкового автомобиля шаровая опора (ШО) — сферический опорный шарнир сухого трения скольжения, — наиболее важный функциональный несущий узел, чаще других выходящий из строя. Характерными отказами для передней подвески являются: износ ШО (30,4 %), течь жидкости из амортизаторов вследствие износа сальниковых узлов (21,8 %), а также разрушение сайлентблоков, старение резинотехнических изделий (45,0 %) и рычагов подвески (2,5 %) [1, 2]. Основными причинами возникновения дефектов ШО при эксплуатации являются: изменение геометрических параметров; износ по массе; пластические деформации; усталостные разрушения; коррозия; физико-химические изменения материала деталей (старение, деструкция) [3, 4]. Критерием долговечности для ШО служит нормативная предельная величина зазора между пальцем и корпусом $[w] = 7$ мм [5, 6]. Согласно ТУ 4591-006-56791834-2005 установлена долговечность ШО по циклам качания — не менее 150 тыс. циклов, после которых суммарный радиальный зазор между пальцем и корпусом не должен превышать 0,700 мм. Сопряжённые рабочие поверхности ШО подвержены различным видам коррозионно-механического изнашивания, таким как газоабразивный (деструкции полимерных элементов и стохастического воздействия агрессивной среды), усталостному, окислительному, а также комбинированному воздействию различных видов изнашивания, что приводит к образованию и росту зазора. Основное назначение полимерных элементов ШО заключается в снижении сил трения и оптимальном распределении контактных напряжений. Однако при этом возможно возникновение сдвиговых пластических деформаций приповерхностного слоя полимерного материала ПС и к его текучести. Одним из направлений в области повышения долговечности ШО в настоящее время является введение в состав его полимерных деталей твердых дисперсных добавок [7].

Исследования в этом направлении производились в два этапа. На первом был произведён сравнительный расчёт упругих свойств серийных ШО и экспериментальных с различным сочетанием макромодифицированных ППС. На втором — теоретически и экспериментально определялась долговечность серийных и экспериментальных ШО.

Многослойный сферический корпус ШО моделировался однослойной сферической оболочкой с неполной сферой на основе классической теории тонких оболочек [8, 9]. При моделировании двухслойная сферическая оболочка приводилась к эквивалентной однослойной. В общем случае оболочка корпуса ШО, состоящая из стальной обоймы и ППС с полимерным ПС, характеризуется двумя жёсткостями на изгиб D_0 , D_x и двумя жёсткостями

на растяжение A_0 и A_x . Указанные жёсткости при $\nu = (\nu_1 + \nu_{II})/2$ на единицу длины можно представить в виде эквивалентного модуля нормальной упругости:

$$E_{\text{экв к}} = \sqrt{E_0 E_x}, \quad (1)$$

где E_0, E_x — жёсткость при изгибе и растяжении соответственно.

Значения $E_{\text{экв м.к}}$ в зависимости от сочетания модификатора и полимера, представлены на рис. 1.

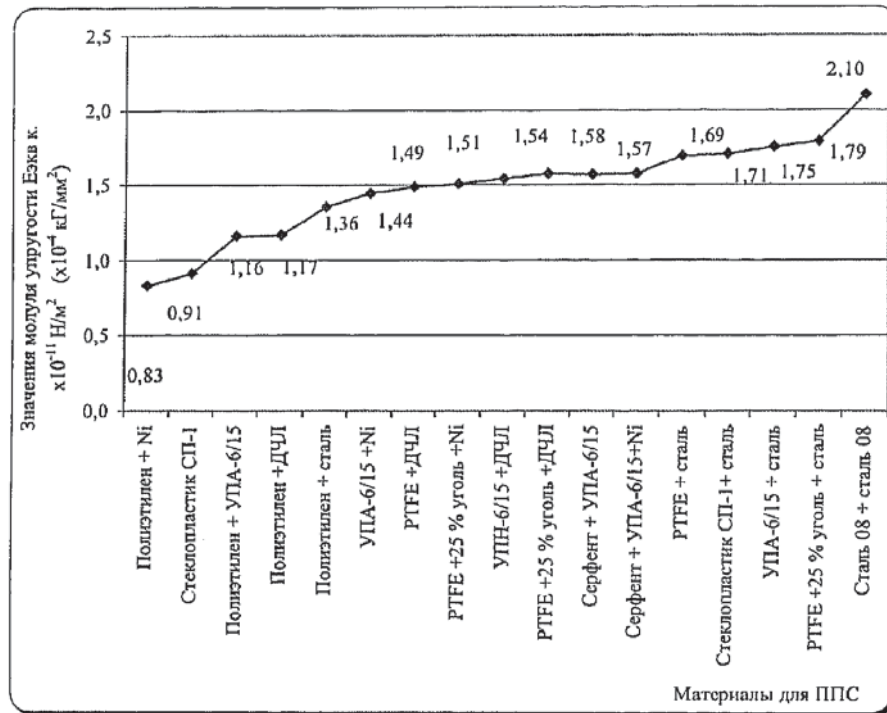


Рис. 1. Значения $E_{\text{экв м.к}}$ корпуса ШО в зависимости от используемых материалов

Приведённый модуль упругости соприкасающихся тел выражается зависимостью

$$E_{\text{пр}} = \frac{2E_1 E_{\text{экв к}}}{E_1 (1 - \nu_{\text{экв к}}^2) + E_{\text{экв к}} (1 - \nu_1^2)} \quad \text{и с достаточной для практики точностью (в пределах}$$

до 10%) позволяет разрешать контактные задачи с учётом работы полимерных слоёв.

Характеристики $E_{\text{экв к}}$ и $E_{\text{пр}}$ даны в табл. 1.

При моделировании на основе теории Герца определены максимальные давления контакта и смещения, вызванные внешней нагрузкой. Упругий контакт при действии нормальной нагрузки F_N на поверхности соприкасания твёрдых тел выражается следующей интегральной зависимостью:

$$F_N = \int_{A_0} p dA,$$

где A_0 — область контакта; p — произвольное нагружение, F_N — нормальная нагрузка.

Схема точечного контакта и распределение давлений по пятну контакта приведена на рис. 2.

Таблица 1

Модуль $E_{экв к}$ ШО в зависимости от материалов ППС

Материал ППС	Модуль упругости полимерного материала E_n , МПа	Модуль упругости двуслойного корпуса ШО $E_{экв к}$, Па	Приведённый модуль упругости пары палец-корпус $E_{пр}$, МПа	Коэффициент, обобщающий свойства материалов пары палец—корпус η , ГПа
П6-10Л	0,2	5,5	8,7	208
КС 30А	0,7	6,4	9,8	186
ПА ВС-У	0,9	6,6	10,1	180
СП-6	3,0	9,1	12,7	143
Сталь ШХ15 +СП6		7,2	18,9	96
Сталь	1,0	1,0	21,0	87

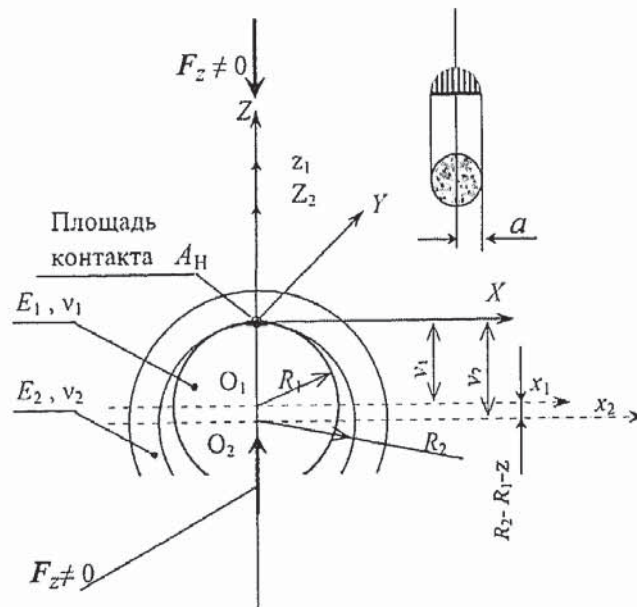


Рис. 2. Схема точечного контакта в ШО

Чем выше значение собственно модуля упругости ППС, тем выше становится значение эквивалентного модуля упругости корпуса в целом (графы 2 и 4 в табл. 1), влияющего на напряженно-деформированное состояние (НДС) корпуса. Применение низко модульных полимеров снижает приведенный модуль почти в 1,5 раза в отношении эквивалентного модуля упругости корпуса, а в случае применения высоко модульных материалов значение приведенного модуля упругости приближается к значению модуля упругости выбранного материала с большим модулем упругости (графы 2 и 5 в табл. 1). ППС выполняется из полимера УПА-6/15-АФД20 [10], имеющего наименьший коэффициент трения ($f=0,02...0,01$) по сравнению с другими полимерами. Однако, несмотря на такой эффективный коэффици-

ент трения, при ударных нагрузках возникают высокие напряжения, приводящие к сдвигу слоев и разрушению ППС, аналогичному разрушению полимерного ПС. Таким образом, за счет разрушения полимерных элементов увеличивается интегральный показатель долговечности — интенсивность изнашивания и происходит преждевременное завершение жизненного цикла ШО в целом как изделия.

Повышение модуля упругости корпуса ШО достигается созданием гетерогенного слоя путем модифицирования исходного полимерного материала ППС металлическим макрополнителем в оптимальном соотношении $V_n/V_m = 9:2$ по объему; где V_n — объем полимера, а V_m — объем модификатора. Таким образом, под нагрузкой сближение центров сферы пальца и корпуса уменьшается, так как модифицированная ППС лучше сопротивляется сжатию.

Пятно контакта становится меньше, уменьшается путь скольжения и интенсивность изнашивания поверхности трения, тем самым повышается долговечность ШО. Распределение аксиальных напряжений в зависимости от отношения z/a представлено на рис. 3.

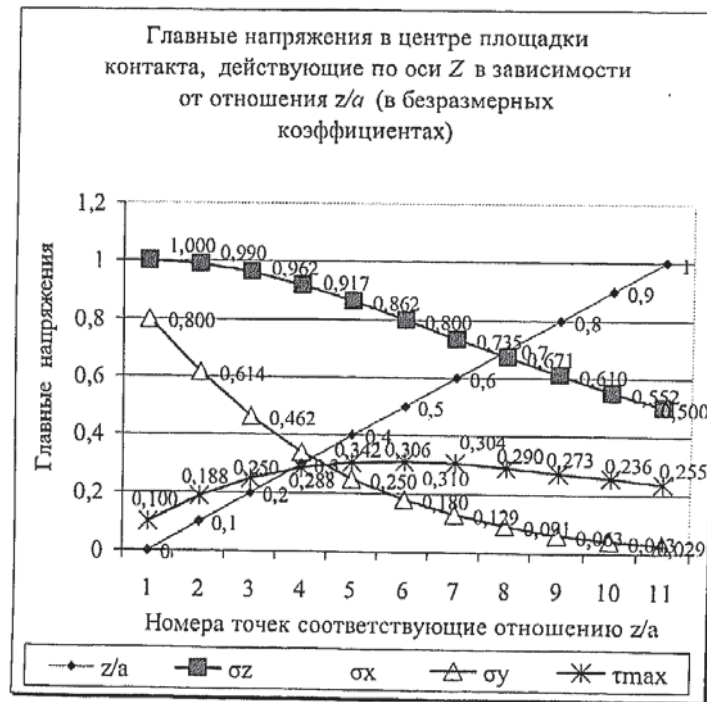


Рис. 3. Распределение аксиальных напряжений действующих в центре площадки контакта по глубине залегания

Применение ППС с металлическим макрополнителем, обладающей высокими упругими свойствами, оказывает существенное влияние на уменьшение технологического зазора от усадки синтетического расплава, так как металлический наполнитель ограничивает образование технологического зазора.

Численные значения a , δ , p_0 в зависимости от модифицирования ППС для 3-х образцов приведены в табл. 2.

Сущность метода заключается в следующем. В синтетический расплав вводится модификатор, представляющий собой гранулы размерами от 0,5 до 1,5 мм шаровидной формы из высокомодульного металла (например Ст. 3). Точность сферической формы гранул не регламентируется. Насыпной объем гранул составляет не более 35 % объема полости между корпусом ШО и пальцем с надетым на него ПС. Количество гранул раз-

мером 1,5 мм должно быть 15...25 % от общего объема гранул, приходящегося на одну ШО. Шероховатость гранул диаметром от 1,0 до 1,5 мм должна составлять не более $Ra = 0,63$, шероховатость гранул диаметром 0,5...1,0 мм не регламентируется. Перед введением в расплав металлический модификатор нагревается до температуры выше температуры расплава полимера на 10...20 °С. Подача металлического наполнителя в расплав производится по отдельному трубопроводу под давлением 150 МПа, регламентированным для расплава. При использовании в качестве наполнителя, например фторопласта-4МБ, применяется метод литья под давлением. Температура расплава и металлического модификатора должна быть в пределах 563...593 К (290...320 °С). Удельное давление в трубопроводах необходимо поддерживать при этом равным 150 МПа. Такой метод позволяет не менять технологического маршрута по изготовлению и сборке ШО, получить изделие с новыми свойствами (в том числе прочностными), обеспечивающими повышенные показатели по критерию долговечности.

Таблица 2

Значения a, δ, p_0 при нагрузке $F_z = 3187$ Н

Наименование деталей ШО	Материал деталей ШО	Радиус площадки контакта A , мм	Сближение пальца и корпуса δ , мкм	Наибольшее давление в центре площадки p_0 , МПа
Образец №3				
Значения a, δ, p_0 с новым материалом				
Палец	ШХ 15	$a = b = 3,373 \cdot 10^{-4} \sqrt[3]{F_z}$ 4,96	$\delta = 0,214 \cdot 10^{-7} \sqrt[3]{F_z^2}$ 4,64	$p_0 = 4,2 \cdot 10^6 \sqrt[3]{F_z}$ 61,8
Крышка 1	Сталь 08			
Крышка 2	Сталь 08			
Полимер	СП-6 + ШХ15			
Образец №2				
Значения a, δ, p_0 с полимером СП-6				
Палец	ШХ 15	$a = b = 3,852 \cdot 10^{-4} \sqrt[3]{F_z}$ 5,67	$\delta = 0,278 \cdot 10^{-7} \sqrt[3]{F_z^2}$ 6,02	$p_0 = 3,218 \cdot 10^6 \sqrt[3]{F_z}$ 47,36
Крышка 1	Сталь 08			
Крышка 2	Сталь 08			
Полимер	СП-6			
Образец №1				
Значения a, δ, p_0 без полимера				
Палец	ШХ 15	4,85	4,32	66,00
Корпус	Сталь 08			

Для сравнения долговечности штатных ШО с новыми разработана математическая модель, описывающая зависимость долговечности ШО от влияния внешней среды, физико-химических и реологических свойств компонентов полимера ППС, ПС и модификатора, нагрузочного и температурного режима, скорости скольжения пальца. С помощью созданной модели удобно варьировать выбором материалов и назначать сочетание полимерного материала ППС и модификатора при изготовлении ШО.

В случае ШО с полимерными ППС и ПС Дроздовым Ю.Н. предложена детерминистическая основа средней безразмерной интенсивности изнашивания в форме

$$\bar{I}_h = K \left(\frac{\bar{p}}{E_1} \right)^{\lambda_1} \left(\frac{u_g}{R_0 T_g} \right)^{\lambda_2} \left(\frac{\tau_g v_0}{R_1} \right)^{\lambda_3} \left(\frac{T_0}{T_g} \right)^{\lambda_4}, \quad (2)$$

где $K = 4,0 \cdot 10^{-6}$ — интегральный коэффициент, учитывающий влияние шероховатости контртела, упругости ППС и ПС, особенности технологии и другие факторы; $\lambda_1 = 1,3$; $\lambda_2 = -1,0$; $\lambda_3 = 0,54$; $\lambda_4 = 0,7$ — безразмерные показатели степени; T_0 — объемная температура трибосопряжения без учета саморазогрева от трения; T_g — температура стеклования полимера; u_g — энергия активации разрушения антифрикционного полимера при T_g ; $R_0 = 8,31$ Дж/моль; τ_g — время релаксации напряжений полимера при T_g ; $v_0 = 6,98 \cdot 10^{-2} \cdot \beta v R_1$ (м/с) — скорость скольжения точки поверхности головки пальца с координатой $\theta = 0$. Инварианты формулы (2) имеют следующий физический смысл: $\Phi_1 = \bar{p} E_1^{-1}$ — деформационный критерий, напряженное состояние полимера; $\Phi_2 = u_g (R_0 T_g)^{-1}$ — инвариант, описывающий термофлуктуационную природу разрушения полимера, энергетический барьер разрушения химических связей, свойственный полимерному материалу; $\Phi_3 = \tau_g V_0 R_1^{-1}$ — комплекс, моделирующий связь вязкоупругих свойств полимера с длительностью процесса его деформирования и аналогичный по структуре известному критерию Деборы; $\Phi_4 = T_0 T_g^{-1}$ — температурный симплекс. Среднее максимальное контактное давление за период эксплуатации ШО

$$\bar{p} = \frac{1}{2} \{ p(0) + p(T) \},$$

$$\text{где } p(0) = \frac{\Delta}{\eta h} \frac{1 - \cos \alpha(0)}{\cos \alpha(0)}, \quad p(T) = \frac{F_z}{\pi R_1^2 \sin \gamma \sin \alpha(T)}.$$

По известным значениям эквивалентного модуля упругости корпуса (1), интенсивности изнашивания (2) и предельному значению зазора определяли долговечность шарнира

$$T = \frac{0,398[w]}{\bar{I}_h R_1 \beta v} 10^{-2}. \quad (3)$$

Для проверки принятых положений и результатов теоретических исследований проводились испытания на специально разработанном стенде [11]. Конструкция и режим его работы позволяли создавать для ШО условия, адекватные реальным условиям эксплуатации. Контролируемыми величинами были пробег по километражу и зазор между пальцем и корпусом ШО. Пробег контролировался по спидометру (аналогично реальным условиям), зазор измерялся стрелочным индикатором часового типа с ценой деления 0,001 мм (аналогично производственным условиям). Стендовые испытания подтвердили результаты теоретических исследований. Интенсивность изнашивания ШО с ППС из угленасыщенного РТФЕ, модифицированного сталью при среднем давлении $\bar{p} = 58,5 \dots 68,6$ МПа составляет $\bar{I}_h = 2,82 \cdot 10^{-8} \dots 6,43 \cdot 10^{-8}$, долговечность по времени соответственно $T = 2,72 \dots 3,36$ года. Результаты расчета долговечности по (3) для базового образца и 14-ти опытных представлены на рис. 4.

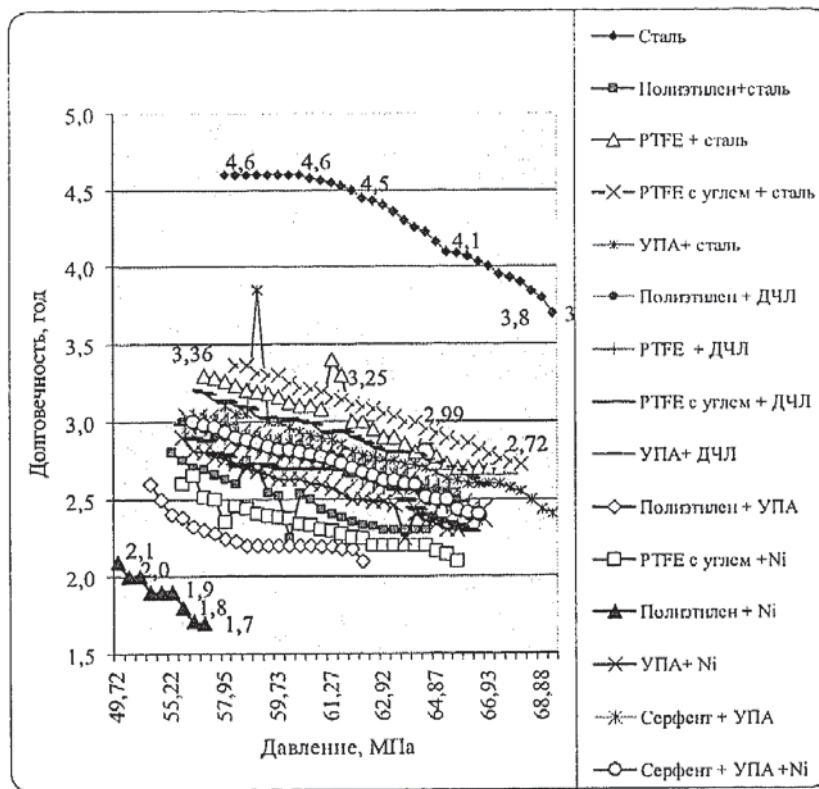


Рис. 4. Зависимость долговечности ШО от давления в площадке контакта

Выводы

1. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования выявили взаимосвязь упругих свойств макромоодифицированных полимерных элементов ШО с повышением долговечности.
2. Установлено, что металлический модификатор повышает упругие характеристики ППС и соответственно долговечность ШО.
3. Установлено, что предпочтительны модификаторы из высокомодульной стали в виде металлических гранул округлой формы с размерами диаметра 0,5...1,5 мм для ППС при изготовлении ШО.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Копилевич Э. В., Пурник М. А., Федоров С. А. Диагностика подвески автомобилей. (Гос. науч.—исслед. ин-т автомобильного транспорта — НИИАТ, Ленфилиал). — Л.: Транспорт, 1973.
2. Орлов. Принципы конструирования. Приложение. Справочник. // Инженерный журнал. — 2003. — № 4.
3. Гаркунов Д. Н., Корник П. И. Виды трения и износа. Эксплуатационные повреждения деталей машин. М.: Изд-во МСХА, 2003. С. 344.
4. Артемов И. И. Моделирование изнашивания и прогнозирование ресурса трибосистем: Монография / И.И. Артемов, В.Я. Савицкий, С.А. Сорокин. — Пенза: Информационно-издательский центр Пензенского государственного университета, 2004. — 374 с.
5. Технические условия ТУ 4591-006-56791834-2005. Палец шаровой передней подвески с защитным чехлом № 2101. Шаровые пальцы передней подвески (в сборе) № 2101
6. Автомобиль ВАЗ-21120 и его модификации. Эксплуатация, техническое обслуживание и ремонт. Составители: Косарев С.Н., Волгин С.Н. — М.: РусьАвтокнига, 2003. — 208 с.
7. Бородин И. Н. Упрочнение деталей композиционными покрытиями. — М.: Машиностроение, 1982. — 141 с.

8. Новожилов В. В., Черных К. Ф., Михайловский Е. И. Линейная теория тонких оболочек — Л.: Политехника, 1991. — 656 с.
9. Прочность. Устойчивость. Колебания. Справочник в трех томах. Под общей редакцией И.А. Биргера и Я.Г. Пановко. — М.: Машиностроение, 1968.
10. ТУ 2253-003-26503454-98. УПА-6/15-АФД20.
11. Войнов А. А. Стенд для испытаний реальных деталей легковых автомобилей // Современные тенденции развития транспортного машиностроения: Сб. статей по материалам X-ой Международной научно-технической конференции: — Пенза: ПДЗ, 2005. — 130 с.