

ОПОРНЫЙ ПОДШИПНИК СКОЛЬЖЕНИЯ НА МАСЛЯНОЙ ПОДУШКЕ

Королева А.А.

*Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,
г. Саратов*

Ключевые слова: подшипник, скольжения, опора, масляная подушка, антифрикционная.

Аннотация. В статье приведена математическая модель, описывающая механизм работы полимерного подшипника скольжения на масляной подушке. Математическая модель отражает влияние геометрических параметров подшипника на момент сопротивления вращению и нагрузочную способность подшипника. Показано, что эффективность подшипника определяется его малым моментом трения, высокой нагрузочной способностью, устойчивостью к ударам и эффекту ложного бринеллирования и простотой конструкции, что обеспечивает его высокую конкурентную способность, как по цене, так и по качеству.

BLOCK BEARING OIL PILLOW

Koroleva A.A.

Saratov state technical university named after Gagarin Yu.A., Saratov

Keywords: bearing, sliding, bearing, oil pillow, anti-friction material.

Abstract. The article presents a mathematical model describing the mechanism of polymer sliding bearing and an oil cushion. The mathematical model reflects the influence of geometrical parameters bearing on the moment of resistance to rotation and load bearing ability. It is shown that the efficiency of the bearing is determined by its low moment of friction, high load capacity, resistance, to impact and effect about brillianity and simple design, which ensures its high competitiveness in price and quality.

В настоящее время в опорах передней подвески автомобилей главным образом используются шариковые подшипники [1-7]. Общим недостатком опорных шариковых подшипников является низкая несущая способность из-за точечного контакта дорожек и тел качения, высокая чувствительность к ударным нагрузкам и вибрациям. Преимущества, которые имеют подшипники качения при высоких скоростях вращения – малый момент трения, низкое тепловыделение и др., теряются при низких скоростях работы подшипников. Поэтому при низкой скорости и высокой нагрузке: в опорах паровых турбин [8], в опорах мельниц [9], в передних стойках автомобилей и др. все чаще и чаще стали заменять опорные подшипники качения на опорные подшипники скольжения.

В последнее время подшипники скольжения, изготовленные с применением трибополимеров, постепенно вытесняют в промышленности металлические подшипники [10-11]. Например, широкое распространение в машиностроении получили фторопластовые подшипники. Это объясняется тем, что фторопластовые подшипники сочетают ряд свойств, делающих их более эффективными в промышленном применении, чем металлические подшипники качения: высокая износостойкость, химическая стойкость, стабильный коэффициент трения, плавность и бесшумность работы, высокая сопротивляемость ударным нагрузкам и эффекту ложного бринеллирования.

Поэтому некоторые ведущие мировые лидеры автопрома, например, фирма HYUNDAI, успешно используют подшипники скольжения в верхней опоре передней подвески своих автомобилей.

Общим недостатком существующих конструкций опорных подшипников качения и скольжения является плохая защищенность от пыли, грязи и влаги, что снижает надежность их работы. К недостаткам опорных подшипников качения относится также быстрое разрушение под действием эффекта ложного бринеллирования.

Целью данной статьи является исследование механизма работы предложенного автором подшипника скольжения на масляной подушке [12]. Конструкция подшипника на масляной подушке приведена на рисунке 1.

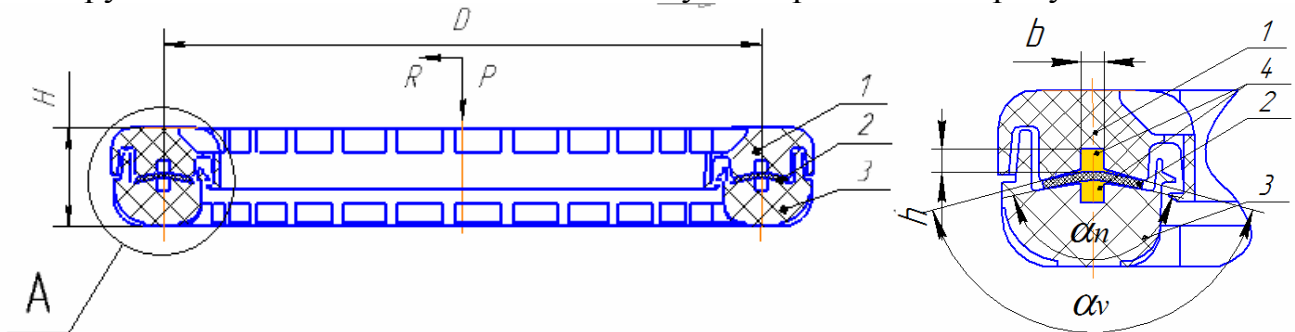


Рис. 1. Конструкция опорного подшипника скольжения на масляной подушке: поперечное сечение подшипника (слева), поперечное сечение рабочей части подшипника (справа)

Как видно из рисунка 1, опорный подшипник скольжения содержит верхнее 1, нижнее 3 опорные кольца, изготовленные из стеклонанополненного полиамида, и расположенную между ними антифрикционную кольцевую прокладку 2, изготовленную из фторопластового материала, например Ф4. Рабочие поверхности опорных колец и фрикционная прокладка расположены аксиально относительно оси подшипника и имеют профиль в виде двух пересекающихся прямых. Причем угол профиля дорожки скольжения нижнего кольца α_n больше угла профиля дорожки скольжения верхнего кольца α_v . По центру профиля дорожек скольжения колец 1 и 3 выполнена масляная канавка глубиной h и шириной b . На рабочих поверхностях колец 1 и 3 и в канавках 4 находится пластичная смазка.

Опорный подшипник скольжения работает следующим образом. Подшипник нагружают осевой силой P и радиальной силой R , а одному из опорных колец, например, верхнему кольцу 1, придают вращение или качание вокруг оси подшипника. Так как углы профиля дорожек скольжения колец 1 и 3 разные и $\alpha_n > \alpha_v$, то под действием внешней осевой нагрузки P рабочие поверхности опорных колец 1 и 3 и поверхности антифрикционной кольцевой прокладки 4 плотно прилегают друг к другу по краям профиля, образуя внутри профиля снизу и сверху антифрикционной прокладки 2 масляные карманы. Излишняя смазка под внешней нагрузкой P выдавливается из рабочей зоны, преодолевая контактные напряжения между кольцами 1 и 3 и антифрикционной

прокладкой 2, а оставшаяся смазка находится под давлением, компенсируя часть внешней нагрузки.

При относительном движении колец 1 и 3 подшипника момент трения возникает только на участке их контакта с антифрикционной прокладкой, а в зоне нахождения смазки трение отсутствует. Поэтому момент трения в подшипнике резко снижается и приближается к моменту трения подшипников качения.

Защемление круговой антифрикционной прокладки 2 по краям делает рабочую зону подшипника не доступной для пыли, грязи и влаги. А так как опорные подшипники, особенно установленные в опорах подвески автомобилей, обычно значительно страдают от загрязнений, то надежная защита подшипника предлагаемой конструкции от внешних воздействий дополнительно повышает его надежность и долговечность.

Так как фторопластовая кольцевая прокладка 2 обладает высокими демпфирующими свойствами, то подшипник обладает высокой сопротивляемостью к ударным нагрузкам и не подвержен разрушению под действием эффекта ложного бринеллирования. Подшипник прост в конструкции и эксплуатации, так как не требует никакого ухода и обслуживания. Тем самым достигаются его высокие эксплуатационные свойства.

На предлагаемую конструкцию опорного подшипника скольжения автором проекта получен патент на полезную модель RU №191208 [1], что подтверждает новизну данной разработки.

Механизм работы подшипника на масляной подушке поясняет рисунок 2. На рисунке 2 изображено поперечное сечение рабочей зоны подшипника. Между кольцами 1 и 2 подшипника расположена фторопластовая прокладка 3. Смазка заполняет все свободное пространство между кольцами 1 и 2 и фторопластовой прокладкой 3. Профили дорожек скольжения колец очерчены прямыми линиями, пересекающимися под углом α у верхнего кольца и под углом $\beta < \alpha$ у нижнего кольца. Поэтому расстояние между точками профиля дорожек скольжения колец различно - минимально по краям дорожек скольжения и максимально в центральной части.

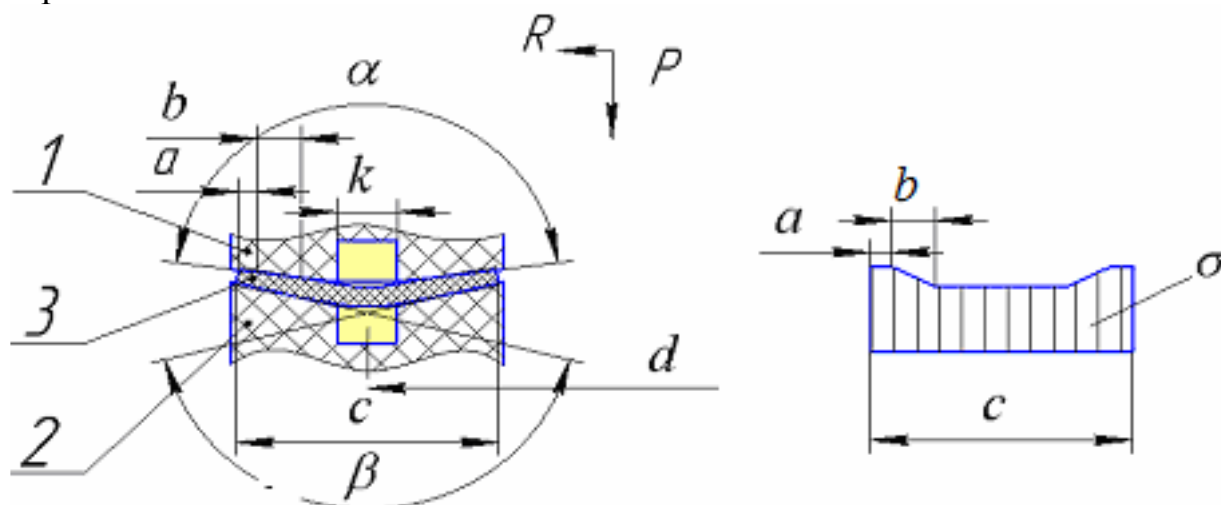


Рис. 2. Поперечное сечение рабочей зоны подшипника

Под действием внешней осевой P нагрузки крайние участки фторопластовой прокладки 3 деформируются, а смазка, являясь несжимаемой жидкостью, находится под давлением. Излишняя смазка выдавилась из зоны контакта в процессе приложения внешней нагрузки, преодолев сопротивление контакта колец 1 и 2 и фторопластовой прокладкой 3.

Справа на рисунке 2 показана эпюра контактных напряжений. Как видно, контактные напряжения распределены не равномерно. На участке a с внешней и с внутренней стороны кольцевая фторопластовая прокладка 3 может подвергаться пластическому смятию, и поэтому на этом участке контактное напряжение равно напряжению смятия σ_s . На участке b фторопластовая прокладка 3 подвергается упругой деформации, поэтому контактные напряжения плавно уменьшаются до минимального значения σ_c . Так как смазка находится под давлением, то она воспринимает на себя часть внешней нагрузки. Но она не препятствует вращению подшипника. Поэтому в трении участвует только находящаяся в контакте с дорожками скольжения часть круговой фторопластовой прокладки.

Элементарные значения сил реакции рабочих поверхностей верхнего кольца подшипника и круговой фторопластовой прокладки на внешнюю осевую и радиальную нагрузки равны:

$$dP = 2\pi \cdot \sigma \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \cdot x dx; \tag{1}$$

$$dR = \sigma \cdot \cos \frac{\alpha}{2} \cdot x dx \cos \varphi d\varphi,$$

где σ - контактные напряжения, создаваемые осевой и радиальной внешними нагрузками, МПа;

x - расстояние от оси подшипника до рассматриваемой точки контакта;

α - угол профиля дорожки скольжения верхнего кольца подшипника, рад;

φ - центральный угол расположения рассматриваемой точки контакта относительно вектора действия радиальной нагрузки, рад .

Интегрируя равенства (1), получим систему уравнений равновесия действующих на рабочую зону подшипника сил:

$$P = 2\pi \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \cdot \left(\begin{array}{l} \sigma_s \int_{\frac{1}{2}(d-c)}^{\frac{1}{2}(d-c)+a} x dx + \frac{\sigma_s - \sigma_c}{2b} \int_{\frac{1}{2}(d-c)+a}^{\frac{1}{2}(d-c)+a+b} x(d-c+2a+2b-2x) dx + \\ + \frac{\sigma_s - \sigma_c}{2b} \int_{\frac{1}{2}(d+c)-a}^{\frac{1}{2}(d+c)} x(2x-d-c+2a+2b) dx + \sigma_s \int_{\frac{1}{2}(d+c)-a}^{\frac{1}{2}(d+c)} x dx + \end{array} \right) + 2\pi \cdot \int_{\frac{1}{2}(d-c)+a+b}^{\frac{1}{2}(d+c)-a-b} x dx \tag{2}$$

$$dR = \sigma \cdot \cos \frac{\alpha}{2} \cdot x dx \cos \varphi d\varphi,$$

$$R = 2\sigma_s \cdot \frac{1}{\operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \cdot \int_0^{\pi/2} \left[\int_{\frac{1}{2}(d-c)}^{\frac{1}{2}(d-c)+a+b} x dx + \int_{\frac{1}{2}(d+c)-a-b}^{\frac{1}{2}(d+c)} x \cdot dx \right] \cos \varphi d\varphi,$$

где d - диаметр центра рабочей зоны подшипника, мм;

a - участок смятия кольцевой фторопластовой прокладки, мм;

b - участок упругой деформации кольцевой фторопластовой прокладки, мм;

c - ширина рабочей зоны подшипника, мм;

σ_s - напряжение смятия кольцевой фторопластовой прокладки, МПа;

σ_c - напряжение, возникающее в масляной подушке, МПа.

Равенство (2) справедливо при условии, что $c - 2a - 2b \geq k$. В противном случае следует принимать $b = 0,5(c - k) - a$. После преобразований равенств (2) получим:

$$P = \frac{\pi}{4} \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \left[\sigma_s \cdot c^2 + \left((c - 2 \cdot a)^2 + (c - 2 \cdot a - 2 \cdot b)^2 \right) \cdot \frac{\sigma_c - \sigma_s}{2} - k^2 \sigma_c \right] + \frac{\pi}{4} k^2 \sigma_c;$$

$$R = \frac{1}{4} \cdot \sigma_R \cdot \cos \frac{\alpha}{2} \cdot \left[(d - c)^2 - (d - c + 2a + 2b)^2 + (d + c - 2a - 2b)^2 - (d + c)^2 \right]. \quad (3)$$

Равенства (3) представляют собой систему из двух уравнений с двумя неизвестными, а именно a и α . Но в явном виде эти величины не выражаются, поэтому для решения этой системы уравнений необходимо привлекать компьютерную технику.

Аналогичным образом определим момент сопротивления вращению подшипника. Элементарный момент сопротивления вращению подшипника равен:

$$dM = 2\pi \cdot \sigma \cdot f \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \cdot x^2 dx + \sigma \cdot \cos \varphi \cdot f \cdot \cos \frac{\alpha}{2} x^2 dx d\varphi, \quad (4)$$

Интегрируя равенство (4) по площадке контакта круговой фторопластовой прокладки с дорожками скольжения колец подшипника, получим:

$$M = 2\pi \cdot f \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \cdot \left(\begin{array}{l} \int_{\frac{1}{2}(d-c)}^{\frac{1}{2}(d-c)+a} x^2 dx + \frac{\sigma_s - \sigma_c}{2b} \int_{\frac{1}{2}(d-c)+a}^{\frac{1}{2}(d-c)+a+b} x^2 (d - c + 2a + 2b - 2x) dx + \\ \frac{\sigma_s - \sigma_c}{2b} \int_{\frac{1}{2}(d+c)-a-b}^{\frac{1}{2}(d+c)-a} x^2 (2x - d - c + 2a + 2b) dx + \sigma_s \int_{\frac{1}{2}(d+c)-a}^{\frac{1}{2}(d+c)} x^2 dx \end{array} \right) +$$

$$+ 2\sigma_s \cdot f \cdot \cos \frac{\alpha}{2} \cdot \int_0^{\pi/2} \left[\int_{\frac{1}{2}(d-c)}^{\frac{1}{2}(d-c)+a+b} x^2 dx + \int_{\frac{1}{2}(d+c)-a-b}^{\frac{1}{2}(d+c)} x^2 \cdot dx \right] \cos \varphi d\varphi.$$

Производя интегрирование, найдем:

$$M = 2\pi \cdot f \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \cdot \left[\begin{aligned} & \frac{\sigma_s}{24} (12d^2a + 2c^2 - (c - 2a)^3) + \\ & + \frac{\sigma_s - \sigma_c}{24b} ((c - 2a)^4 - 2(c - 2a - 2b)^4 + 48d^2b(c - 2a - b)) + \\ & + \frac{1}{24} ((d + c - 2a)^3 - (d + c - 2a - 2b)^3) \left(\sigma_c - (\sigma_s - \sigma_c) \frac{d + c - 2a - 2b}{2b} \right) + \\ & + \frac{1}{24} ((d - c + 2a + 2b)^3 - (d - c + 2a)^3) \left(\sigma_c + (\sigma_s - \sigma_c) \frac{d - c + 2a + 2b}{2b} \right) \end{aligned} \right] + (5)$$

$$+ \frac{1}{12} f \cdot \sigma_s \cdot \cos \frac{\alpha}{2} \left((d + c)^3 - (d + c - 2a - 2b)^3 + (d - c + 2a + 2b)^3 - (d - c)^3 \right)$$

Полученные выражения (3) и (5) отражают механизм работы опорного подшипника скольжения на масляной подушке и позволяют оптимизировать его геометрические параметры по критерию минимального момента сопротивления вращению.

Список литературы

1. Патент №106695 РФ. Подшипник верхней опоры направляющей пружинной стойки подвески автомобиля / Калинин С.Н. – Оpubл. 20.07.2011, Бюл. №20.
2. Патент № 2087763 РФ. Шарнирный подшипник скольжения и способ его изготовления / Королев А.А., Курбатов В.П., Дорофеев В.Ю. – Приоритет от 17.03.1994.
3. Авторское свидетельство СССР №1682091. Способ изготовления деталей / Королев А.А. – Оpubл. 07.10.1991.
4. Патент № 2391568 РФ. Подшипник и способ его изготовления / Королев А.В., Королев А.А., Королев А.А. – Оpubл. 10.06.2010, Бюл. №16.
5. Патент № 2481501 РФ. Шариковый упорно-радиальный подшипник / Королев А.В., Харев Г.А. – Оpubл. 10.05.2013, Бюл. № 13.
6. Патент № 2570516 РФ. Упорно-радиальный подшипник качения / Королев А.В., Королев А.А. – Оpubл. 10.12.2015, Бюл. № 34.
7. Патент № 2604907 РФ. Подшипник / Королев А.В., Королев А.А., Скрипкин А.А., Дьяченко Т.Ю., Денисов А.А. – Оpubл. 20.12.2016, Бюл. № 35.
8. Эсперов Д.Г. Совершенствование конструкций опорных подшипников скольжения паровых турбин на основании экспериментальных исследований: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Санкт-Петербург, 2016.
9. Патент № 2451844 РФ. Опорный подшипник скольжения / Егoшин Ю.С., Кгошин К.Ю. – Оpubл.: 27.05.2012, Бюл. №15.
10. Патент № 183796 РФ. Упорный подшипник скольжения / Королев А.В., Королев А.А., Королев А.А. – Оpubл. 02.10.2018. Бюл. № 28.
11. Патент №183831 РФ. Опорный подшипник / Королев А.В., Туренко А.П., Королева А.А. – Оpubл. 04.10.2018, Бюл. № 28.
12. Патент №191208 РФ. Опорный подшипник / Королев А.В., Королев А.А., Королева А.А. – Оpubл. 29.07.2019, Бюл. № 22.

Сведения об авторе:

Королева Анастасия Андреевна – студентка СГТУ им. Гагарина Ю.А., г.Саратов.