

УДК 621.891:621.316

ОЦЕНКА ТОЛЩИНЫ СМАЗОЧНОГО СЛОЯ В ПОДШИПНИКАХ КАЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОРЕЗИСТИВНЫМ МЕТОДОМ

С. В. КОРОТКЕВИЧ, О. В. ХОЛОДИЛОВ

РУП «Гомельэнерго»

УО «Белорусский государственный университет транспорта»

Гомель, Беларусь

UDC 621.891:621.316

EVALUATION OF THE THICKNESS OF A LUBRICANT LAYER IN BEARINGS ELECTRORESISTIVE METHOD

S. V. KOROTKEVICH, O. V. KHOLODILOV

Аннотация

Описана методика оценки толщины граничного смазочного слоя, основанная на измерении его электрического сопротивления. Приведены расчетные соотношения, подтвержденные результатами эксперимента. Данный метод может быть использован для диагностирования состояния поверхностей качения колец подшипников в процессе эксплуатации, осуществления входного контроля качества изготовления и сборки, ремонта, а также для оценки триботехнической эффективности и эксплуатационных свойств пластичных смазочных материалов, используемых в подшипниках.

Ключевые слова:

подшипник качения, пластичный смазочный материал, граничный смазочный слой, электрическое сопротивление, сопротивление стягивания, туннельная проводимость, теория Герца.

Abstract

The described method of estimating the thickness of the boundary lubricant layer, based on measuring its electrical resistance. Shown the calculated ratios supported by the results of the experiment. This method can be used for condition diagnostics of rolling surfaces of bearing rings in the process of operation, the implementation of the input quality control of manufacturing and Assembly, repair, and estimation of the tribotechnical effectiveness and operational properties of grease used in bearings.

Key words:

rolling bearing, grease, boundary lubrication layer, electric resistance, contraction, tunneling conductivity, Hertz theory.

Для обеспечения работоспособности триботехнических систем, например, подшипников качения, необходимо обеспечить минимальные толщины смазочной пленки, обеспечивающей гидродинамические условия смазывания. Существуют различные методы измерения толщины смазочной пленки [1, 2].

Реальный контакт твердых тел, работающих в режиме граничной смазки, можно описать с помощью моделей поверхности раздела, которые могут иметь место с учётом наличия на поверхности металлов оксидных плёнок. При наличии в зоне контакта сплошной смазочной прослойки толщиной d , его сопротивление определяется в основном туннельной проводимостью:

$$R_0 = \left(\frac{10^{-14}}{a^2 \varphi^{0,5}} \right) \exp(10,24 \varphi^{0,5} d),$$

где φ – эффективная работа выхода электрона; a – радиус пятна контакта; d – толщина смазочного слоя.

Применение расчетных соотношений теории стягивания и туннельной проводимости к анализу экспериментально полученных значений контактного сопротивления позволяет оценивать толщину (нанометрового диапазона) пленок, разделяющих контактирующие тела.

Цель исследований – разработать метод оценки толщины граничного смазочного слоя (ГСС), основанный на измерении его электрического сопротивления.

Методика испытаний

При исследовании граничного трения вопрос об определении фактической площади контакта трущихся тел имеет ключевое значение. В связи с тем, что заранее сформировать площадь контакта в динамически нагруженном подшипнике невозможно, представляет интерес использование электрорезистивного метода для оценки толщины ГСС.

В качестве объекта исследования был взят подшипник качения ZVL6302/16 (Словакия) с внешним диаметром кольца 42 мм, внутренним – 16 мм, ширина колец – 13 мм, диаметр шариков – 8 мм, количество шариков – 7 шт., ширина дорожки внутреннего и внешнего колец – 6 мм.

Подшипник промывался в ацетоне и керосине, высушивался и заполнялся исследуемым смазочным материалом (СМ). Для каждого нового СМ брался новый подшипник. В качестве СМ использовались Prolong (США) с противозадирными добавками EP (extremal pressure); МРУС-4; Литол-24; 158М; Солидол.

Результаты исследований и их обсуждение

Расчет номинальной площади контакта сопряжённых тел осуществляется из соотношений классической теории Герца. Площадь контакта S шарика с кольцом подшипника составляет эллипс с полуосями a^* и b (рис. 1), где большая полуось a^* направлена перпендикулярно дорожке качения (направлению качения).



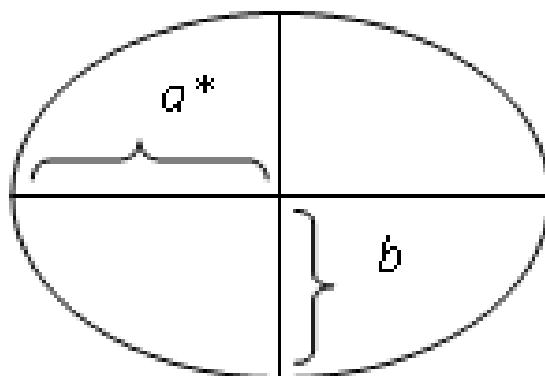


Рис. 1. Схема контакта шарика с кольцом в подшипнике

Радиус пятна контакта шара с плоскостью a^* определяется величиной нагрузки, механическими свойствами тел и их геометрическими размерами и оценивается из соотношений для упругой деформации тел:

$$a^* = 1,11 \left(\frac{NR}{E} \right)^{1/3},$$

где N – нагрузка; R , E – эффективный радиус и модуль упругости, соответственно.

Эффективный радиус R рассчитывается по формуле

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_2} \pm \frac{1}{R_1},$$

где R_1 и R_2 радиусы контактирующих тел, знак плюс «+» берётся при контакте выпуклых тел, а знак минус «-» при контакте цилиндра и соответствующей цилиндрической выемки. Так как кольца и шарики изготовлены из одного материала (подшипниковая сталь типа ШХ 15), то эффективный модуль равен модулю упругости стали – $2,6 \cdot 10^{11}$ Па. Рассчитанный эффективный радиус R для внешнего и внутреннего колец составляет $3,3 \cdot 10^{-3}$ и $2,8 \cdot 10^{-3}$ м соответственно. Рассчитанные значения радиуса пятна касания a^* в зависимости от нагрузки N для схемы шарик–плоскость приведены в табл. 1, где P_{cp} – среднее контактное давление.

Табл. 1. Расчётные значения радиуса пятна касания a^* , среднего контактного давления $P_{\text{ср}}$, сопротивлений стягивания R_s , оксидной плёнки $R_{\text{ок}}$, общего R

$N, \text{Н}$	$a^*, \text{мкм}$	$S, 10^{-12} \text{м}^2$	$P_{\text{ср}}, \text{ГПа}$	$R_s, \text{МОм}$	$R_{\text{ок}}, \text{МОм}$	$R, \text{МОм}$
20	74,90	17 615	1,1	2,00	56,8	58,8
100	128,10	51 526	1,9	1,20	19,4	19,6
200	161,30	81 696	2,5	0,90	12,2	13,1
400	203,30	129 779	3,1	0,74	7,7	8,4
600	232,70	170 029	3,5	0,64	5,9	6,5
800	256,10	205 944	3,9	0,58	4,9	5,5
1000	275,80	238 846	4,2	0,54	4,2	4,7
1200	293,10	270 118	4,4	0,51	3,7	4,2
1400	308,50	298 841	4,7	0,49	3,3	3,8
1600	322,60	326 782	4,9	0,47	3,1	3,6
1800	335,45	353 387	5,1	0,45	2,8	3,3
2000	347,40	378 956	5,3	0,43	2,6	3,0

Сопротивление стягивания R_s рассчитывается по формуле

$$R_s = \frac{\rho}{2a^*},$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление стали равное $3 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Сопротивление $R_{\text{ок}}$ с учётом наличия оксидной плёнки рассчитывается по формуле

$$R_{\text{ок}} = \frac{\sigma}{S},$$

где σ – удельное поверхностное сопротивление оксидной плёнки стали равное $10^{-9} \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$.

С учётом того, что шарик контактирует с внутренним и внешним кольцами подшипника, величина сопротивления стягивания, оксидной плёнки будет равна сумме соответствующих сопротивлений:

$$\begin{aligned} R_s &= R_{s \text{ внут}} + R_{s \text{ внеш}} ; \\ R_{\text{ок}} &= R_{\text{ок внут}} + R_{\text{ок внеш}} ; \\ R &= R_{\text{внут}} + R_{\text{внеш}} . \end{aligned}$$

В табл. 2 приведены результаты расчета некоторых параметров подшипников качения. Следует отметить, что они носят приближенный характер. Это связано, одной стороны, с экспериментальной оценкой длин отпечатков, а с другой, с использованием соотношений теории Герца, где рассматриваются идеально гладкие поверхности, без учёта шероховатости соприкасающихся тел, в нашем случае колец и шариков подшипника.

Табл. 2. Расчётные значения параметров подшипников качения

N, H	$a,$ мкм	$a^*,$ мкм	$b_{\text{внут}},$ мкм	$b_{\text{внеш}},$ мкм	$S_{\text{внут}},$ 10^{-10} м^2	$S_{\text{внеш}},$ 10^{-10} м^2	$P_{\text{внут}},$ ГПа	$P_{\text{внеш}},$ ГПа	$R_s,$ МОм	$R_{\text{ок}},$ Ом	$R,$ МОм
	74,9	299,6	69,4	70,0	653	659	0,31	0,30	1,00	30,5 0	31,5
100	128,1	512,4	113,8	120,2	1831	1934	0,55	0,50	0,60	10,7 0	10,3
200	161,3	645,2	143,3	151,4	2903	3067	0,69	0,65	0,40	6,70	7,1
400	203,3	813,2	180,5	190,7	4609	4869	0,90	0,80	0,36	4,30	4,7
600	232,7	930,8	206,6	218,2	6038	6377	1,00	0,94	0,32	2,27	3,6
800	256,1	1024,4	227,4	240,2	7315	7726	1,10	1,00	0,30	2,69	2,9
1000	275,8	1103,2	244,9	258,7	8483	8961	1,20	1,10	0,28	1,32	2,6
1200	293,1	1172,4	260,3	274,9	9583	10120	1,25	1,20	0,26	2,00	2,2
1400	308,5	1234	274,0	289,4	10617	11214	1,30	1,25	0,24	1,84	2,1
1600	322,6	1290,4	286,4	302,5	11605	12257	1,40	1,30	0,24	1,66	1,9
1800	335,5	1341,8	298,0	314,6	12555	13255	1,43	1,36	0,22	1,55	1,8
2000	347,4	1389,6	308,5	325,9	13461	14220	1,50	1,40	0,22	1,44	1,7

Индексы «внутр.», «внеш.» соответствуют значениям, для внутреннего и внешнего колец подшипника соответственно

Чувствительность схемы при тарировке на 1 Ом составляет 40 мВ падения напряжения, выше 40 мВ чувствительность снижается. Поэтому необходимо увеличивать сопротивление R_2 на порядок или более.

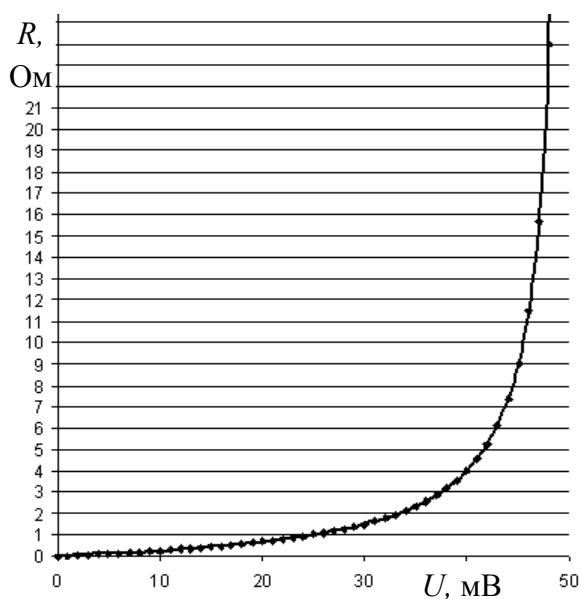


Рис. 2. Зависимость контактного сопротивления от падения напряжения в контакте при $R_2 = 1 \text{ Ом}$

В табл. 3 приведены значения регистрируемого в процессе проведения эксперимента падения напряжения и соответствующие им значения туннельного сопротивления в зависимости от толщины d ГСС.

Эффективная работа выхода электрона ϕ при толщинах ГСС $d = 0,5\text{--}1,4 \text{ нм}$ составляет 2,025 эВ, а при 1,5–2,0 нм – 1,8 эВ.

Измерение контактного сопротивления осуществлялось с использованием 4-проводной электрической схемы при напряжении U на разомкнутом контакте 50 мВ, что исключает электрический пробой ГСС и протекание электрохимических процессов в зоне контакта [3].

Табл. 3. Зависимость падения напряжения U и туннельного сопротивления R_t от толщины d ГСС

d , нм	R_t , Ом	U , мВ
0,5	0,003	0,1 (при $R_2 = 1$ Ом)
0,6	0,006	1,0 ($R_2 = 1$ Ом)
0,7	0,030	2,0 ($R_2 = 1$ Ом)
0,8	0,100	4,0 ($R_2 = 1$ Ом)
0,9	0,800	22,0 ($R_2 = 1$ Ом)
1,0	5,200	42,0 ($R_2 = 1$ Ом)
1,1	36,500	48,0–49,0 ($R_2 = 1$ Ом)
1,2	397,700	40,0 ($R_2=10^2$ Ом)
1,3	2 939,000	37,5 ($R_2=10^3$ Ом)
1,4	22 000,000	34,5 ($R_2=10^4$ Ом)
1,5	166 722,000	31,1 ($R_2=10^5$ Ом)

Необходимо отметить, что точность оценки толщины ГСС, коррелирует с точностью её оценки методом послойного травления в среде аргона и анализа химического состава поверхностного слоя с использованием рентгенофотоэлектронной спектроскопии. Было установлено, что спектры химически активных элементов серы, хлора и фосфора, содержащиеся в составе ГСС, отсутствуют после травления поверхности в течении 600 с при скорости травления 0,1 нм в течении 60 с. Таким образом, толщина ГСС составляет 1 нм, что полностью коррелирует с результатами оценки заявляемого способа.

Методика оценки толщины ГСС включает в себя следующие действия:

- 1) исходя из соотношений теории Герца, определяем радиус фактического пятна контакта (см. табл. 2);
- 2) работа выхода электрона ϕ является известной величиной (приведена в описании) и берется из справочных данных;
- 3) толщину d граничного смазочного слоя (расстояние между электродами) в «нм» задаём сами;
- 4) таким образом, все параметры, входящие в формулу для расчёта R_t известны;
- 5) регистрируем в процессе эксперимента значения падения напряжения между валом и внешним кольцом подшипника и определяем величину контактного сопротивления;
- 6) сравниваем регистрируемую величину контактного сопротивления с рассчитанной и, в зависимости от его абсолютного значения, оцениваем толщину смазочного слоя.

Выводы

Предложенный способ может быть использован для диагностирования состояния поверхностей качения колец подшипников в узлах в процессе эксплуатации, осуществления входного контроля качества изготовления и сборки, ремонта опор качения, а также для оценки триботехнической эффективности пластичных смазочных материалов, используемых в подшипниках и их эксплуатационных свойств. Причем его можно использовать для различных схем контакта: шар-плоскость, ролик-ролик, ролик-сегмент, ролик-шар и т. д., для которых рассчитываются параметры контакта (радиус пятна контакта, фактическое контактное давление и т. д.) в т. ч. и подшипник качения произвольной конфигурации (роликовый, шариковый и т. д.), а не только игольчатой конфигурации, что существенно расширяет область применения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Abraham, G. Method for monitoring the conditions of lubrication of tribologic elements / G. Abraham // Proc. of the 5th Intern. Congress on Tribology: Espoo, Finland. Vol. 5: June 12, 1989, P. 1–7.
2. А. с. **1439439 МПК4 G01M 13/04 23.11.1988**. Способ измерения толщины смазочного слоя в игольчатых подшипниках и устройство для его осуществления / М. В. Райко и [др.].
3. **Хольм, Р.** Электрические контакты / Р. Хольм. – М. : Изд-во: «Иностранной литературы», 1961. – 464 с.