

В общем случае при нанесении покрытий на пластины можно предложить следующую схему деформации деталей (табл. 1).

Таким образом, если коэффициент линейного расширения покрытия меньше, чем основы, то наблюдается последовательное увеличение прогиба детали. Это говорит о том, что в покрытии возникают напряжения одного знака.

Если коэффициент линейного расширения покрытия больше, чем основы, то прогиб уменьшается, т. е. в покрытии возникают напряжения обратного знака. При соответствующих толщинах подложки и значениях коэффициентов линейного расширения может произойти изменение направления прогиба. Это будет свидетельствовать об изменении знака напряжения в покрытии. Предварительная дробеструйная обработка существенно влияет на деформацию плоских деталей. С увеличением толщины подложки это влияние ослабевает, и при толщине $h = 6$ мм деформация происходит только за счет разности коэффициента термического расширения, покрытия и основы.

Таким образом, в результате проделанной работы установлено, что напыление пластин толщиной менее 6 мм нецелесообразно, так как при этом значительно возрастает деформация деталей. Коэффициенты линейного расширения покрытия существенно влияют на величину и характер деформации плоских деталей. Для получения в покрытии сжимающих напряжений необходимо применять такие покрытия, которые имеют меньший коэффициент линейного расширения, чем у подложки.

УДК 621.891-822.001.5

В.С.Яцур а, канд.техн.наук (БПИ)

НЕКОТОРЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ МАЛОГАБАРИТНЫХ ШАРИКОПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛОВ, РАБОТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ ИМПУЛЬСИВНОГО НАГРУЖЕНИЯ

Развитие точного приборостроения требует повышения чувствительности выпускаемых приборов и увеличения их срока службы.

Настоящая работа посвящена изучению работоспособности шарикоподшипниковых узлов вращающейся упругой системы ротор - подшипник, подверженной воздействию серии периодических кратковременных возмущающих сил, поперечных ударов с ускорением силы удара в пределах $j_{OH} = 50 - 150g$ (где g - ускорение силы тяжести). Исследования проводились на ударном

стенде марки СУ-1, в качестве объектов испытаний принимались опоры, состоящие из корпуса, вращающегося стального ротора (массой 0,102 кг) и двух радиальных однорядных шарикоподшипников № 1000095 (класса точности Р6). Испытания проводились партиями, размером каждой в 20–40 пар (опор). Контрольные партии подшипников (без воздействия ударных нагрузок) состояли из 15 пар. Ротор с внутренними кольцами подшипников вращался посредством гибких валиков от электродвигателей типа СЛ-369А с редукторами. В качестве критерия оценки работоспособности приборных подшипников (критерия их выбраковки) принято значение момента сил трения в опоре (в паре подшипников), т. е. значение их сопротивления вращению. Перед испытанием шарикоподшипники прирабатывались, тщательно несколько раз промывались, после чего собирались в опору по радиальному зазору (с отклонением $\leq 1-2$ мкм), а опоры подбирались в партию по значению момента сил трения. Момент сил трения в подшипниках определялся методом выбега на специальной установке. Опоры снимались с испытаний при достижении ими условного предельного значения момента сил трения в подшипниках (фиксировался отказ): $M_{\text{пред.1}} = 5 \cdot 10^{-5}$ Н·м; $M_{\text{пред.2}} = 20 \cdot 10^{-5}$ Н·м и $M_{\text{пред.3}} = 35 \cdot 10^{-5}$ Н·м.

Сведения о смазочных материалах даны в табл. 1, результаты испытаний (ранжированный ряд отказов) подшипниковых узлов на долговечность и надежность приведены ниже.

Таблица 1

Сведения о смазочных материалах

Смазочный материал		Номера партий		
Марка	Кинематическая вязкость $\nu_m \cdot 10^{-5}$ при 323 К, м ² /с	Ускорение силы удара $j_{\text{он}} \cdot g$		Без ударов
		50	150	
Масло ОКБ-122-5 (ТУ МХП №4216-55)	6,2	3, 5, 17	1–Е9	4,7
Масло МВП(ГОСТ 1805-51)	2,45	–	11	–

Примечания. 1. В таблице указаны номера партий, остальные же данные режимов испытаний приведены перед соответствующими результатами исследований.

2. Количество масла в подшипниках характеризуется условной толщиной масляной пленки $h_{\text{см}}$. Так, в партиях №№ 7, 9, 11 и 17 – $h_{\text{см}} = 0,1$ мкм, в № 1-Е и 5 – $h_{\text{см}} =$

$= 1,5$ мкм и в №№ 3 и 4 – $h_{\text{см}} = 3,0$ мкм.

3. Подшипники прирабатывались парами в тех же приспособлениях, в которых проводились последующие испытания, в течение 10–12 ч (смазывались перед этим смесью масла ОКБ-122-5 и бензина при $n = 1500$ об/мин и радиальной нагрузке в 1 Н).

4. Ось ротора установлена горизонтально, наносился вертикальный удар, температура окружающей среды равна 291–293 К, относительная влажность воздуха – 81–84 %.

Наработка на отказ в часах для приработанных шарикоподшипников № 1000095 Р6 - партия 4 - без воздействия поперечных ударов составила (масло ОКБ-122-5; $h_{\text{см}} = 3,0$ мкм; $n = 60$ об/мин; $m = 15$ пар подшипников в партии):

при $M_i \leq M_{\text{пред.1}} = 5 \cdot 10^{-5}$ Н·м

30; 50; 60; 120; 165; 240; 330; 390; 420; 510; 690; 870; 880; 4020; 4230.

Наработка на отказ в часах для приработанных шарикоподшипников № 1000095 Р6 - партия 7 - без воздействия ударов составила (масло ОКБ-122-5; $h_{\text{см}} = 0,1$ мкм; $n = 60$ об/мин; $m = 15$ пар):

при $M_i \leq M_{\text{пред.1}} = 5 \cdot 10^{-5}$ Н·м

84,0; 84,5; 91,0; 94,0; 94,5; 98,0; 101,5; 105,0; 105,6; 122,5; 168,0; 175,0; 185,5; 189,0; 290,0;

при $M_i \leq M_{\text{пред.2}} = 20 \cdot 10^{-5}$ Н·м

98,0; 115,5; 126,0; 150,5; 196,0; 213,8; 217,0; 224,0; 535,5; 567,0; 598,6; 689,3; 1991,5; 2261,0; 2509,0;

при $M_i \leq M_{\text{пред.3}} = 35 \cdot 10^{-5}$ Н·м

119,0; 283,6; 314,0; 385,3; 563,6; 700,0; 700,2; 1886,5; 1987,0; 1987,0; 2093,0; 2135,0; 2338,0; 2345,0; 2548,0.

Количество циклов ударов $N \cdot 10^5$ до отказа для партии № 3 испытанных шарикоподшипниковых узлов (удары с ускорением силы удара $j_{\text{он}} = 50g$ и частотой $\nu = 80$ ударов/мин; масло ОКБ-122-5; $h_{\text{см}} = 3,0$ мкм; $n = 60$ об/мин; $m = 20$ пар) составило:

при $M_i \leq M_{\text{пред.1}}$

1,71; 2,10; 2,12; 2,28; 2,74; 2,76; 2,89; 3,19; 3,43; 4,07; 4,50; 4,77; 5,15; 5,47; 5,53; 6,62; 7,06; 8,30; 8,40; 21,05;

при $M_i \leq M_{\text{пред.2}}$

4,97; 5,16; 6,08; 7,19; 7,40; 8,57; 8,72; 8,96; 9,64; 11,33; 12,16; 12,41; 12,60; 12,73; 12,92; 14,50; 19,36; 21,25; 21,30; 21,41;

при $M_i \leq M_{\text{пред.3}}$

8,72; 9,05; 9,25; 9,27; 10,50; 11,78; 11,90; 13,11; 13,14; 13,16; 13,25; 13,75; 19,82; 20,40; 21,59; 21,63; 21,68; 21,80; 22,30; 22,38.

Количество циклов ударов $N \cdot 10^5$ до отказа для партии № 5 испытанных шарикоподшипниковых узлов (удары с $j_{\text{он}} = 50g$ и $\nu = 80$ ударов/мин; масло ОКБ-122-5; $h_{\text{см}} = 1,5$ мкм; $n = 60$ об/мин; $m = 20$ пар) составило:

при $M_i \leq M_{\text{пред.1}}$

0,08; 0,11; 0,16; 0,19; 0,21; 0,27; 0,30; 0,31; 0,36; 0,47; 0,82; 0,86; 0,91; 1,10; 1,13; 1,15; 1,16; 1,17; 2,15; 2,22;

при $M_i \leq M_{\text{пред.2}}$

0,55; 0,60; 0,92; 1,19; 2,03; 2,41; 2,66; 2,71; 3,10; 3,49;
3,50; 4,64; 5,00; 5,53; 5,63; 6,42; 7,23; 7,93; 9,50; 13,94;

при $M_i \leq M_{\text{пред.3}}$

6,92; 7,32; 7,64; 7,68; 8,23; 8,25; 8,41; 8,92; 9,10; 12,88;
13,37; 14,99; 15,60; 15,93; 16,51; 16,95; 17,00; 17,28;
17,70; 17,91.

Количество циклов ударов $N \cdot 10^5$ до отказа для партии № 9
испытанных шарикоподшипниковых узлов (удары с $j_{\text{OH}} = 150\text{g}$ и
 $v = 80$ ударов/мин; масло ОКБ-122-5; $h_{\text{CM}} = 0,1$ мкм; $n =$
 $= 60$ об/мин; $m = 40$ пар) составило:

при $M_i \leq M_{\text{пред.1}}$

0,006; 0,008; 0,011; 0,012; 0,014; 0,016; 0,021; 0,023;
0,028; 0,052; 0,058; 0,062; 0,064; 0,066; 0,067; 0,068;
0,070; 0,072; 0,074; 0,080; 0,089; 0,094; 0,098; 0,100;
0,101; 0,104; 0,113; 0,114; 0,122; 0,132; 0,178; 0,186;
0,219; 0,239; 0,242; 0,246; 0,250; 0,356; 0,597; 0,758;

при $M_i \leq M_{\text{пред.2}}$

0,027; 0,038; 0,047; 0,055; 0,056; 0,073; 0,083; 0,084;
0,258; 0,278; 0,288; 0,291; 0,295; 0,344; 0,352; 0,360;
0,366; 0,415; 0,445; 0,492; 0,505; 0,635; 0,899; 0,959;
1,070; 1,428; 1,510; 1,923; 2,000; 2,045; 2,060; 2,443;
2,539; 2,557; 3,320; 3,439; 3,488; 3,492; 3,500; 3,521;

при $M_i \leq M_{\text{пред.3}}$

0,505; 0,537; 0,550; 0,577; 0,618; 0,728; 0,921; 1,225;
1,349; 1,580; 1,614; 1,635; 1,665; 1,743; 1,820; 2,094;
2,101; 2,144; 2,261; 2,339; 2,348; 2,708; 2,720; 2,750;
2,940; 3,140; 3,192; 3,200; 3,203; 3,281; 3,340; 3,557;
3,567; 3,603; 3,650; 3,678; 3,679; 3,710; 3,741; 3,822.

Количество циклов ударов $N \cdot 10^5$ до отказа для партии № 1-Е
испытанных шарикоподшипниковых узлов (удары с $j_{\text{OH}} = 150\text{g}$ и
 $v = 80$ ударов/мин; масло ОКБ-122-5; $h_{\text{CM}} = 1,5$ мкм; $n =$
 $= 60$ об/мин; $m = 20$ пар) составило:

при $M_i \leq M_{\text{пред.1}}$

0,350; 0,366; 0,368; 0,382; 0,383; 0,400; 0,415; 0,433;
0,450; 0,466; 0,600; 0,700; 0,850; 0,899; 0,930; 1,150;
1,200; 1,680; 1,830; 3,740;

при $M_i \leq M_{\text{пред.2}}$

0,950; 1,050; 1,250; 1,280; 1,300; 1,330; 1,580; 1,660;
1,850; 2,420; 2,780; 3,500; 4,260; 4,500; 4,860; 5,750;
7,000; 7,800; 10,300; 10,370;

при $M_i \leq M_{\text{пред.3}}$

3,700; 4,720; 4,900; 5,050; 5,150; 5,200; 5,610; 7,600;

8,000; 8,600; 8,790; 9,050; 9,290; 9,400; 9,820; 10,200;
10,250; 10,500; 10,520; 11,300.

Количество циклов ударов $N \cdot 10^5$ до отказа для партии № 11 испытанных шарикоподшипниковых узлов (удары с $j_{\text{ОН}} = 150 \text{ г}$ и $v = 80$ ударов/мин; масло МВП; $h_{\text{СМ}} = 0,1$ мкм; $n = 60$ об/мин; $m = 20$ пар) составило:

при $M_i \leq M_{\text{пред.1}}$

0,257; 0,292; 0,300; 0,319; 0,323; 0,338; 0,344; 0,345;
0,350; 0,354; 0,368; 0,375; 0,391; 0,395; 0,424; 0,432;
0,438; 0,875; 1,138; 1,150;

при $M_i \leq M_{\text{пред.2}}$

0,800; 0,894; 0,897; 0,938; 0,987; 1,012; 1,054; 1,531;
1,575; 1,588; 1,800; 1,975; 1,991; 2,025; 2,030; 2,038;
2,070; 2,188; 2,400; 2,410;

при $M_i \leq M_{\text{пред.3}}$

0,888; 1,107; 1,163; 1,200; 1,250; 1,284; 1,294; 1,763;
1,775; 1,838; 2,063; 2,201; 2,225; 2,232; 2,240; 2,263;
2,275; 2,575; 2,645; 2,724.

Количество циклов ударов $N \cdot 10^5$ до отказа для партии № 17 испытанных шарикоподшипниковых узлов (удары с $j_{\text{ОН}} = 50 \text{ г}$ и $v = 80$ ударов/мин; масло ОКБ-122-5; $h_{\text{СМ}} = 0,1$ мкм; $n = 60$ об/мин; $m = 20$ пар) составило:

при $M_i \leq M_{\text{пред.1}}$

0,033; 0,050; 0,067; 0,082; 0,100; 0,117; 0,133; 0,150;
0,167; 0,184; 0,200; 0,216; 0,300; 0,350; 0,684; 0,950;
0,965; 0,980; 1,165; 4,000;

при $M_i \leq M_{\text{пред.2}}$

0,333; 0,349; 0,363; 0,416; 0,483; 1,300; 1,431; 1,465;
2,800; 3,050; 3,625; 3,980; 4,450; 4,650; 5,050; 6,025;
6,220; 6,410; 9,550; 9,650;

при $M_i \leq M_{\text{пред.3}}$

1,710; 2,190; 3,120; 3,500; 4,250; 4,290; 5,220; 5,250;
5,950; 7,100; 7,190; 10,020; 10,050; 10,090; 10,300;
11,020; 11,200; 11,620; 12,200; 12,390.

Полученные данные позволяют предположить, что при испытаниях или эксплуатации приборных шарикоподшипников в условиях воздействия ударных нагрузок и при оценке их работоспособности по величине момента сил трения срок службы (математическое ожидание количества циклов ударов N_i до отказа с заданной вероятностью) зависит от режимов смазки ($h_{\text{СМ}}$, $v_{\text{М}}$) и интенсивности внешнего нагрузочного воздействия ($j_{\text{ОН}}$). Результаты обработки исследований на надежность подшипниковых узлов применительно к различным законам распределения будут представлены в последующих выпусках этого сборника.