

УДК 621.922

В.Ю. Денисюк, В.Ю. Заблоцький, В.І. Марчук

Луцький національний технічний університет

## АНАЛІЗ ВИРОБНИЧИХ ДЕФЕКТІВ ВИГОТОВЛЕННЯ КІЛЕЦЬ РОЛИКОПІДШИПНИКІВ ЗА ВІБРОАКУСТИЧНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Розглянуто статистичний аналіз виробничих дефектів, які виникають в процесі виготовлення деталей роликів підшипників, який показав, що основними причинами виникнення дефектів поверхневого шару за точністю та хвилястістю поверхні є коливні процеси динамічної системи формоутворення робочих поверхонь кілець роликів підшипників на операціях токарної обробки, алмазно-абразивних операціях і частково на суперфінішних і доводочних операціях.

Ключові слова: шліфування, доріжка кочення, хвилястість, вібрація, роликів підшипник, віброакустична характеристика.

Однією з основних задач, що стоять у даній час перед вітчизняною підшипниковою промисловістю, є зниження рівнів вібрації і шуму підшипників кочення. Головним напрямком рішення цієї задачі є вдосконалення технології виготовлення підшипників: підвищення геометричної точності кілець і тіл кочення (кульок і роликів), зменшення шорсткості робочих поверхонь, використання ізотропних за пружними властивостями вихідних матеріалів, забезпечення високого ступеня очищення мастильних матеріалів і деталей, а також чистоти складання, належних умов монтажу й експлуатації.

Експлуатаційні характеристики роликів підшипників визначаються дією технологічних факторів при виготовленні окремих деталей, при складанні підшипників, а також залежать від умов, точності формоутворення робочих поверхонь і їх фізико-механічних властивостей.

В реальних конструкціях підшипників робочі поверхні доріжок кочення і тіл обертання мають похибки форми, хвилястість, відхилення за параметрами шорсткості. Ці похибки є основною причиною виникнення радіального та осевого биття кільця, що обертається. Певний вплив на величину биття підшипників кочення мають і похибки виготовлення тіл кочення та їх різномірність в комплекті [2]. Але внаслідок значної кількості тіл кочення в комплекті роликів підшипників, а також того, що допуск на виготовлення тіл кочення на порядок менший допуску на виготовлення поверхонь кочення кілець, різниця діаметрів тіл кочення в значній мірі компенсується пружними деформаціями в місцях контакту. Завдяки цьому вважається [2, 7], що за існуючих технологічних вимог щодо виготовлення тіл кочення та сортування комплектів, впливом похибок виготовлення тіл кочення на величину биття підшипника можна знехтувати.

Допустимі відхилення розмірів, форми та взаємного розміщення приєднувальних поверхонь деталей підшипникових опор при несприятливому сполученні в процесі складання (монтажу) можуть значно погіршити точність та надійність роботи підшипників і їх сполучень в опорах кочення. При складанні таких виробів підшипникові кільця, внаслідок власної відносно невеликої шорсткості, набувають форми, близької до сумарної форми спряжених посадочних поверхонь.

Оцінка ступеня спотворення форми доріжок кочення кілець підшипників здійснюється за допомогою коефіцієнта передачі похибки форми з посадочною поверхнею на доріжку кочення [2].

$$K_{\phi} = \frac{\Delta r_{\text{вих}}}{\Delta r_{\text{вх}}} \quad (1)$$

де  $\Delta r_{\text{вих}}$  – відхилення від круглості доріжки кочення кільця після його монтажу на вал чи в корпус опори;

$\Delta r_{\text{вх}}$  – приведенне відхилення від круглості посадочної поверхні вала чи корпусу, що дорівнює сумі відхилень від круглості посадочних поверхонь вала (корпусу) і внутрішнього (зовнішнього) кільця підшипника.

Аналогічно визначаються коефіцієнти передачі для окремих гармонік похибок форми посадочних поверхонь (овальність, огранка).

Результати досліджень [5] свідчать, що на формування вихідної некруглості доріжок кочення кілець переважно впливають низькочастотні складові похибок форми посадочних поверхонь підшипникових вузлів – вала і корпусу (овальність, трьох- і чотиригранність). При цьому інтенсивність копіювання похибки форми залежить від величини натягу посадки. Найбільша ступінь копіювання відповідає натягу, чисельно рівному або більшому приведенного (сумарного) відхилення від круглості посадочної поверхні вала чи корпусу  $\Delta r_{ex}$ .

Найбільшим рівнем копіювання похибок форми посадочних поверхонь характеризуються радіально-упорні та радіальні двошрядні роликові підшипники (залежно від типорозмірів підшипників  $K_\phi=0,75\div 0,95$  для зовнішніх кілець,  $K_\phi=0,7\div 0,9$  для внутрішніх кілець). Найменш чутливим до передачі похибок форми посадочних поверхонь є конічні роликові підшипники ( $K_\phi=0,65\div 0,75$  для зовнішніх кілець,  $K_\phi=0,6\div 0,7$  для внутрішніх кілець).

Однією з вагомих причин незадовільної роботи підшипників і зниження точності опор є також і взаємний перекис кілець підшипників, що виникає внаслідок похибок розміщення посадочних поверхонь вала та корпусу, деформацій згину, непаралельності бортів кілець базовим торцям тощо.

Радіальні роликопідшипники досить чутливі до перекосу кілець, починаючи з величин в  $1\div 2$  кутові хвилини. Внаслідок такого перекосу виникає нерівномірність контактних напружень по довжині ролика, що насамперед впливає на довговічність підшипника [2].

Внаслідок вище зазначених похибок виготовлення та складання підшипників в підшипникових опорах виникають дефекти, які умовно називають розподіленими. Ці дефекти, на відміну від точкових або локальних (тріщини, вм'ятини, сколи, викришування на поверхнях кочення), проявляються у вібраціях підшипників, як стаціонарні процеси, що забезпечує можливість їх моделювання та віброакустичної діагностики [6]. Встановлено, що найбільший вплив на вібрації спричиняють активні елементи підшипника – кільця і тіла обертання. Причому, якщо обертається внутрішнє кільце, то точність його геометричних форм і тіл кочення мають вирішальне значення. В загальному випадку коливання кілець підшипників поділяють на три групи [1, 3, 4].

Перша група – коливання з великою довжиною хвиль (до 10 коливань за 1 оберт кільця). Причиною її виникнення є радіальні биття кілець підшипників, що можуть досягати 15 мкм. У випадку ексцентриситету в з'єднанні кільця з валом частота цих коливань буде відповідати частоті обертів вала.

Друга група – коливання з середньою довжиною хвиль (10 – 60 коливань за 1 оберт кільця). Причина таких коливань – хвилястість доріжок кочення. Амплітуда коливань 1 – 3 мкм [2].

Третя група – коливання з малою довжиною хвиль (більше 60 коливань за 1 оберт кільця). Причина цих коливань – мікронерівності з амплітудою до 0,1 мкм [6].

Вібрації зовнішнього кільця підшипника виникають завдяки циклічним змінам навантажень підшипника. В цьому випадку вібрації виникають навіть в підшипниках з ідеальною геометричною формою і створюються вони коченням по геометрично недосконалих поверхнях кілець.

Додаткові джерела вібрацій, що мають другорядне значення – пов'язані зі згинаючими деформаціями кілець і коливаннями жорсткості підшипника (структурні недосконалості), а також джерела, що пов'язані з конструктивними недоліками роликопідшипника.

Вібрації, що обумовлені змінною податливістю, розділяють на дві різновидності.

1. Вібрації з змінною контактною податливістю, коли має місце радіальне складове навантаження, що діє на під'ятник внаслідок того, що пружне зміщення контактів Герца під навантаженням змінюється зі зміною положення комплексу тіл кочення відносно лінії дії навантаження.

2. Вібрації, що обумовлені пружною контактною деформацією, значні тільки в діапазоні частот, близьких до частоти обертання підшипника, і при збільшених радіальних навантаженнях [6].

Таким чином, основним джерелом вібрацій пов'язаних з негативним впливом на експлуатаційні характеристики підшипника є хвилястість доріжок кочення та бортків внутрішнього кільця конічного роликопідшипника [7]. Так, при зменшенні хвилястості доріжки кочення від 2,0 до 0,05 мкм, рівень вібрації знижується на 14 дБ [6]. В більшій мірі на рівень вібрації впливає хвилястість внутрішніх кілець. Так, зі зменшенням хвилястості останніх від 2,2 до 0,05 мкм рівень вібрації понижується на 20 дБ [6]. Те ж саме стосується і рівня хвилястості тіл

кочення. Так зменшення хвилястості роликів від 0,2 до 0,05 мкм понижує рівень вібрації на 8 – 10 дБ.

Аналіз літературних джерел [2, 4, 6] і проведений комплекс експериментальних досліджень показали, що рівень вібрації і шуму роликотішипників понижується з покращенням (до певної межі) шорсткості. Так зміна шорсткості поверхні доріжки кочення з Ra 0,32 до 0,16 мкм дозволяє знизити рівень вібрації на 3,5 – 4 дБ.

Цікаво, що максимум інтенсивності частотних спектрів приходяться на частоти 600 – 700, 1400 – 1500 і 7200 Гц, найзначніше зменшення вібрації проходить у високочастотній смузі спектру (450 – 9500 Гц), а в низькочастотній смузі змін не спостерігається, і спектри частот в межах 50 – 150 Гц в більшості підшипників майже співпадають.

Відомо [6], що відношення між мікрорельєфом доріжки кочення і звуковим тиском пропорційне добутку кількості нерівностей (виступів) на їх висоту, сумі добутку навантаження на внутрішні і зовнішні кільця і тіла кочення. Навантаження на ці елементи залежать від співвідношення числа контактів однієї точки кожного елемента з іншими. Так, якщо навантаження на зовнішнє кільце рівне 1, то на внутрішнє кільце воно буде 2, а на тіла кочення – 10. Тому мікронерівностей (виступів) на тілах кочення повинно бути в 10 разів менше, як на зовнішньому кільці. Враховуючи це, в технологічному процесі формоутворення контактуючих поверхонь вирішальне значення набувають операції суперфінішування і притирання. Але не менш важливим чинником, що впливає на кінцевий стан робочої поверхні, є фактор технологічної спадковості. Це означає, що віброактивність поверхні, контактна міцність, зносостійкість і інші експлуатаційні характеристики формуються на попередніх операціях технологічного процесу і остаточно закріплюються на викінчувальних операціях.

В таблиці 1 наведені значення похибок мікронерівностей доріжок кочення кілець підшипника 7305А у вигляді амплітуд відповідних гармонік. Найбільші значення амплітуд властиві 2-й гармоніці, що відповідає похибці форми доріжок кочення (еліптичність). Встановлено, що величина похибки відхилення від форми, хвилястості і навіть шорсткості поверхні впливає на амплітуду вібрації, яка виникає в підшипнику під час обертання одного з кілець.

Таблиця 1

Характеристики похибок виготовлення доріжок кочення кілець підшипника 7305А ВАТ "СКФ Україна"

Зовнішнє кільце: амплітуди (мкм) гармонік ( $\lambda$ )											
$\lambda$	№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
кільця		0,028	0,085	0,039	-	0,015	0,014	0,27	0,006	-	
		0,054	0,061	0,030	0,013	0,010	0,009	0,013	-	0,007	,009
		0,048	0,112	0,044	0,073	0,007	0,029	0,025	0,017	0,010	,012
		0,072	0,215	0,042	0,03	0,029	0,015	0,029	0,016	0,009	,010
$\lambda$	№	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
кільця		-	0,007	-	0,010	0,009	0,008	-	-	0,006	,006
		-	0,006	0,009	0,009	-	-	0,007-	-	-	
		-	-	0,008	-	-	0,007	0,009	0,093	-	,006
		-	-	0,008	0,020	0,015	-	-	0,013	0,009	,019
Внутрішнє кільце: амплітуди (мкм) гармонік ( $\chi$ )											
$\chi$	№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		0,041	0,100	0,048	0,007	0,008	0,018	-	0,006	0,006	

кіл ьц я		0,059	0,143	0,048	0,055	0,009	0,016	0,063	-	0,005	,005
		0,275	0,209	0,083	0,033	0,041	0,008	0,028	0,006	0,005	,009
		0,065	0,086	0,011	0,041	0,043	0,051	0,106	0,010	0,005	
кіл ьц я	№	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
		-	-	0,026	-	-	-	0,011	-	-	
		0,005	-	-	-	0,007	-	-	-	-	
		-	-	-	0,005	-	-	-	-	-	
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Зовнішнє кільце: фази (град.) гармонік ( $\lambda$ )											
кі ль ця	№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
		138	45	52	-	18	10	22	34	-	-
		255	142	99	61	37	52	17	-	30	8
		119	82	33	41	39	18	15	15	30	
	210	119	37	47	60	15	19	34	-		

Продовж. табл. 1.

кіл ьц я	№	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
		-	8	-	1	1	0	-	-	9	4
		-	29	17	19	-	-	5	-	-	
		-	-	10	-	-	10	5	15	-	
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Внутрішнє кільце: фази (град.) гармонік ( $\chi$ )											
кіл ьц я	№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
		354	128	8	51	38	7	-	11	30	
		54	123	33	79	62	45	24	-	36	0
		156	115	90	45	36	5	1	44	10	
		241	150	116	44	1	4	49	11	35	
кіл ьц я	№	11	12	13	14	15	16	17	18	19	0
		-	-	19	-	-	-	14	-	-	
		19	-	-	-	11	-	-	-	-	
		-	-	-	6	-	-	-	-	-	
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Не дивлячись на високий рівень вдосконаленості підшипникового виробництва, проведений аналіз статистичних даних щодо стану проблеми забезпечення якості в цій галузі промисловості, дає підстави зробити висновок про те, що всезростаючі вимоги до якості і конкурентоспроможності вітчизняних підшипників випереджують можливості виробничих підприємств до своєчасного і бездоганного забезпечення цих вимог. Крім відомих причин економічного характеру, таке становище на підшипникових заводах пов'язане з необхідністю адаптації підприємств до умов ринкової економіки, що вимагає змінювати тип і характер виробництва з масового на гнучкопереналагоджувальне серійне виробництво з відпрацюванням

можливості постачання виробів під замовлення. Така зміна характеру і умов підшипникового виробництва створює додаткові труднощі і проблеми в технологічному, організаційному і метрологічному забезпеченні якості деталей і виробів. Успішне вирішення цієї проблеми можливе на основі комплексного науково обґрунтованого підходу, що базуватиметься на сучасних науково-технічних досягненнях техніки і технології.

Важливою характеристикою підшипника, що в значній мірі визначає його експлуатаційні властивості є рівень шумності, який визначається за допомогою віброакустичних випробувань. Для визначення причин виникнення невідповідностей шумових характеристик виготовлених на ВАТ "СКФ Україна" конічних роликотпідшипників з існуючими на підприємстві стандартами проводились дослідження безпосередньо у виробничих умовах на десятих типорозмірах конічних роликотпідшипників. З кожної наступної партії досліджуваних підшипників вибирали по 10 підшипників в різні години зміни (початок, середина і кінець зміни), а також на початку місяця і в кінці календарного місяця. Таким чином з кожного типорозміру досліджувалось  $30 \times 2 = 60$  підшипників. Всього було досліджено 600 підшипників на протязі трьох місяців. Основні мікро- та макрохарактеристики поверхонь складових деталей з кожної групи (10 шт.) досліджуваних підшипників записувались в журналі випробувань. Кінцевий аналіз і співставлення результатів контролю параметрів робочих поверхонь кілець підшипників з результатами віброакустичних випробувань дозволили з досить високим рівнем достовірності встановити відсоток найпоширеніших дефектів (табл. 2, рис. 1), а також визначити основні причини, що призводять до виникнення дефектів і невідповідностей. В таблиці 2 наведені основні причини відхилень віброакустичних характеристик досліджуваних підшипників, що можуть виникати в певні періоди життєвого циклу деталей підшипників (виготовлення, складання, експлуатація).

При аналізі невідповідностей параметрів геометрії робочих поверхонь підшипників на ВАТ "СКФ Україна" (рис. 1) наступні середньорічні об'єми невідповідностей в % до загального об'єму виготовлених деталей певного найменування:

- невідповідність кута доріжки кочення зовнішніх кілець конічних роликотпідшипників	- 22,5 %
- невідповідність кута доріжки кочення внутрішніх кілець	- 7,5 %
- невідповідність форми ролика	- 20,4 %
- мінімальний момент (легкість) обертання	- 11,1 %
- рухома неперпендикулярність доріжки кочення зовнішніх кілець	- 7,5 %
- невідповідність зовнішнього діаметра	- 4,4 %
- візуальні дефекти внутрішніх кілець	- 2,5 %
- ширина зовнішнього кільця	- 2,2 %
- візуальні дефекти підшипника	- 2,2 %
- діаметр отвору внутрішнього кільця	- 2,2 %

Таблиця 2

Причини відхилень віброакустичних характеристик підшипників

Назва причини	Періоди життєвого циклу		
	Виготовленя	Складання (монтаж)	Функціонування
Геометрія поверхонь кілець та роликів:			

- хвилястість	+		
- невідповідність форми	+	+	
- непрямолінійність твірних робочих поверхонь	+		
- відхилення кутів нахилу твірних доріжок кочення	+		
Пошкодження доріжки кочення:			
- при маркуванні	+	+	
- при шліфуванні	+		
- попадання бруду	+	+	+
- попадання частинок абразиву і піску	+	+	+
Втомленість			+
Напруження в кільцях	+	+	
Сепаратор	+	+	+
Змащування	+	+	
Власні коливання	+	+	+

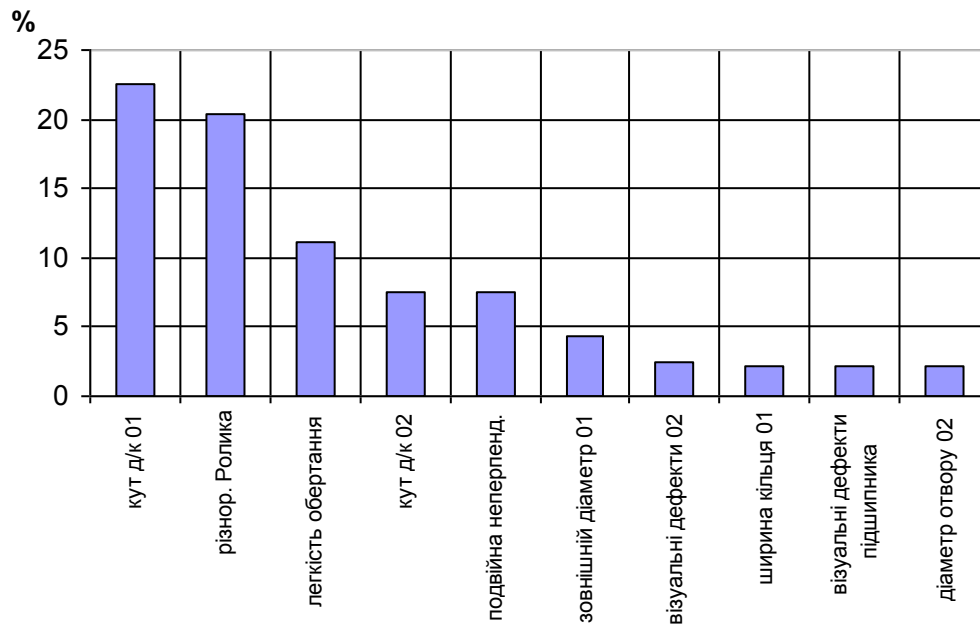
Аналіз невідповідностей значень мікрогеометричних параметрів показав такі відносні величини об'ємів дефектів робочих поверхонь деталей роликотідшипників:

- відхилення від прямолінійного борта (хвилястість)	- 46,7 %
- кут борта	- 28,2 %
- хвилястість доріжки кочення внутрішнього кільця	- 26,4 %
- хвилястість доріжки кочення зовнішнього кільця	- 24,5 %
- шорсткість упорного борта	- 16,3 %
- відхилення від прямолінійності доріжки кочення внутрішнього кільця	- 6,4 %
- площинність борта внутрішнього кільця	- 4,4 %
- хвилястість борта внутрішнього кільця	- 4,4 %
- шорсткість доріжки кочення зовнішнього кільця	- 4,4 %

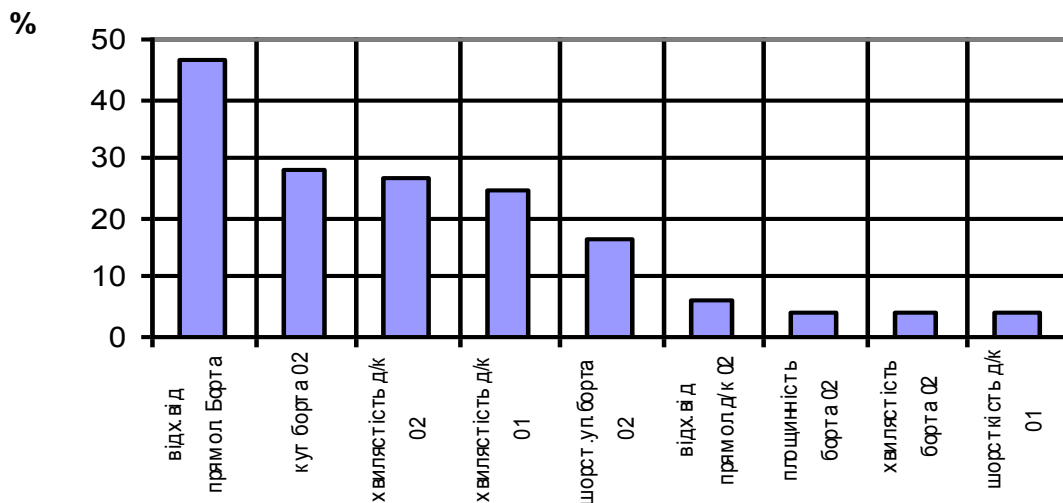
При випробуванні підшипників на відповідність віброакустичних характеристик допустимим нормам були встановлені основні причини, що призводять до появи таких невідповідностей, а також причини технологічного характеру, що викликають названі дефекти. В таблиці 3 наведені зв'язки дефектів і невідповідностей, що мали місце в досліджуваних партіях роликотідшипників під час статистичного аналізу з причинами технологічного характеру:

1. Непостійність кута нахилу доріжок кочення твірної до осі зовнішнього та внутрішнього кільця.
2. Непрямолінійність борта внутрішніх кільця.
3. Завищений кут підйому борта.
4. Невідповідність допуску на середній діаметр доріжки кочення зовнішнього та внутрішнього кільця.

5. Відхилення від прямолінійності твірної доріжок кочення зовнішнього та внутрішнього кілець.
6. Відхилення від некруглості доріжок кочення зовнішніх та внутрішніх кілець.
7. Завищена різностінність доріжок кочення зовнішнього та внутрішнього кілець.



а) невідповідність геометрії



б) невідповідність мікрогеометрії

Рис. 1. Гістограми відносних значень невідповідностей параметрів деталей підшипників в середньому за 2010 рік, а – параметри геометрії; б – параметри мікрогеометрії

До основних причин технологічного характеру, які призводять до появи вказаних дефектів на виробництві є такі (таблиця 3):

1. Причини пов'язані з налаштуванням і технічним станом технологічного устаткування.

2. Недоліки технологічного оснащення і спорядження.
3. Недоліки вибраної системи формоутворення робочих поверхонь деталей підшипників.
4. Нехтування фактором технологічної спадковості при формуванні технологічного маршруту обробки робочих поверхонь.
5. Невідповідність режимів різання.
6. Алмазно-абразивний і вирівнювальний інструмент.
7. Додаткові вібрації механізмів верстата, нерівноженість ріжучого інструменту. Таблиця 3

Зв'язок дефектів робочих поверхонь деталей підшипників з причинами, що їх породжують

Причина	Найбільш поширені дефекти	Х	Н	Н	Н	Н	Н	Б	З
		вля стість і огранка 01. 02	епо стійність кута 01. 02	епря мо- лінійність упорного борта 02	орст кіст ь д/к 01. 02	амаг ніче ніст ь кілець	рудн і кільця 01. 02		абої ни 01. 02
Биття шпинделя		+							
Невідповідність режимів формоутворення		+			+				
Налагодження верстату			+	+	+				
Абразивний інструмент				+	+				
Правлячий інструмент (алмаз)					+				
Погано підготовлена база (неплощинність базового торця)			+	+					
Вібрація шпинделя і верстата		+							
Невідповідність оснащення КД						+			
Брудність кілець							+		
Низька культура виробництва									+
Технологічна спадковість		+		+		+			

Статистичний аналіз виробничих дефектів, які виникають в процесі виготовлення деталей роликів підшипників, показав, що основними причинами виникнення дефектів поверхневого шару за точністю та хвилястістю поверхні є коливні процеси динамічної системи



формування робочих поверхонь кілець роликотідшипників на операціях токарної обробки, алмазно-абразивних операціях і частково на суперфінішних і доводочних операціях.

1. Вибрації в техніке: Справочник Т.З. Колебания машин, конструкций и их элементов. / Под ред. Ф.М. Диментберга и К.С. Колесникова, 1980. – 544с.
2. Данильченко Ю.М., Кузнецов Ю.М. Прецизійні шпиндельні вузли на опорах кочення (теорія і практика). – Тернопіль – Київ, Економічна думка, 2003. 344 с.
3. Журавлев В.Ф., Бальмот В.Б. Механика шарикоподшипников гироскопов. – М.: Машиностроение, 1986. – 248 с.
4. Левин А.Н. Методы автоматического управления уровнем колебаний в металлорежущих станках. – Станки и инструмент, 1973, №3. – С. 30-32.
5. Марчук В.І., Денисюк В.Ю., Заблоцький В.Ю., Аналіз виробничих дефектів поверхонь обертання кілець роликотідшипників // Наукові нотатки: Міжвуз. зб. Луцького національного технічного університету (за напрямком “Інженерна механіка”). Вип. 24. – Луцьк: ЛНТУ, 2009. – С. 183–192.
6. Рагульскис К.М., Юркаускас А.Ю. Вибрації підшипників. / Под ред. К.М. Рагульскиса. – Л.: Машиностроение, ленинградское отделение, 1985, – 119 с.
7. Черменский О.Н., Федотов Н.Н. Подшипники качения: Справочник-каталог.- М.: Машиностроение, 2003. – 576 с.; ил.