

6. Висока продуктивність процесу, до декількох квадратних метрів за годину.
7. Практично виключення нагрівання матеріалу в процесі очищення поверхні.
8. Низька енергоємність процесу очищення поверхні – кілька кВт.
9. Висока екологічність технологічного процесу.
10. Мобільність обладнання.

Необхідно відзначити ще одну істотну перевагу лазерного очищення поверхні. Лазерний пучок не затуплюється, не зношується, не забруднюється (засмічується, засалюється тощо), що дозволяє забезпечити високу технологічну відтворюваність процесу лазерного очищення поверхні. Тому, розвиток промислових лазерних випромінювачів дозволяє на сучасному етапі розглядати процеси лазерного очищення як реальну, економічно доцільну альтернативу класичним методам очищення.

Таким чином, виникає концепція комбінованої лазерної обробки поверхні, коли можна говорити не просто про її лазерне очищення, а й про підготовку до подальших видів обробки (фарбування, зварювання) або до експлуатації з підвищеним ресурсом в результаті одночасної з очищенням лазерним поліруванням, зміцненням, підвищенням корозійної стійкості тощо.

Інформаційні джерела

1. Вейко В.П., Либенсон М.Н., Червяков Г.Г., Яковлев Е.Б. Взаимодействие лазерного излучения с веществом, силовая оптика. М., Физматлит, 2008. – 312 с.
2. Гаркунов Д.Н. Триботехника. – М.: Машиностроение, 1985. – 424 с.
3. Шнейдер Ю.Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом. Л., Машиностроение, 1982. – 248 с.
4. Грилихес С.Я., Обезжиривание, травление и полирование металлов. – Л.: Машиностроение, Ленинград. Отд., 1983. – 101 с.
5. Голямина И.П., Ультразвук. – М.: Изд-во «Советская энциклопедия», 1979. – 400с.
6. Крылов К.И., Прокопенко В.Т., Митрофанов А.С. Применение лазеров в машиностроении и приборостроении. Л., Машиностроение, 1978. – 335 с.
7. Денисюк В.Ю., Харчик М.М., Буць Б.П. Лазерні технології в сучасному машино- та приладобудуванні “Перспективні технології та прилади”. Збірник наукових праць. Випуск №5(2). м. Луцьк, листопад 2014 р. – Луцьк: Луцький НТУ, 2014. – С. 33–36.

УДК 621.822:681.2:369.64

¹Заблюцький В.Ю., к.т.н., ²Дахнюк О.П.

¹Луцький національний технічний університет

²ДП Луцький ремонтний завод «Мотор»

ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ МІКРОГЕОМЕТРІЇ РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ КІЛЕЦЬ ПІДШИПНИКІВ

У статті подано методику вимірювання параметрів мікрогеометрії робочих поверхонь кілець підшипників у поєднанні з динамічними характеристиками. Особливістю даної методики є опис мікрогеометричних параметрів шорсткості та хвилястості через гармонічні ряди Фур'є у вигляді складної періодичної функції, що містить високочастотні складові.

В статье приведена методика измерения параметров микрогеометрии рабочих поверхностей колец подшипников на базе динамических характеристик. Особенностью данной методики является представление микрогеометрических параметров шероховатости и волнистости посредством гармонических рядов Фурье как сложной периодической функции с высокочастотными составляющими.

The article describes a method of measuring the parameters of micro-geometry of working surfaces bearing rings on the basis of dynamic characteristics. A special feature of this technique is to present micro-geometrical parameters of roughness and waviness by harmonic Fourier series as a complex periodic function with high-frequency components.

Відомо [1], що на зносостійкість робочих поверхонь спряжених деталей типу «тіло обертання» спричиняють значний вплив параметри мікро- та мікрогеометрії серед яких ватро виділити шорсткість та хвилястість. Під час експлуатації згадані вище характеристики являються

генераторами коливань, що спричиняють появу небажаних вібрацій у підшипникових вузлах та значно зменшують ресурс підшипника. Таким чином, вимірювання динамічних параметрів мікрогеометрії робочих поверхонь кілець підшипників для прогнозування рівня вібрацій з метою попередження виготовлення продукції, що має низький ресурс є актуальною науково-практичною задачею.

Розглянемо залежність вібрації підшипників від круглості доріжок та тіл кочення деталей, включаючи високочастотні складові спектру – хвилястість, а також методи і засоби її оцінки.

На реальних поверхнях кочення виникають нерівності з різними кроком та амплітудою відхилень. При обертанні внутрішнього кільця підшипника одночасна взаємодія відхилень на поверхнях кочення обох кілець та тіл кочення викликає коливання зовнішнього кільця підшипника, тобто його вібрації. Переміщення зовнішнього кільця описується складною періодичною функцією і вигляді ряду Фур'є, яка складається з простих гармонічних коливань з круговими частотами, які є кратними основній:

$$S(t) = a_0 + \sum_{i=1}^{i=k} a_i \cos(\omega i t + \varphi_i),$$

де $S(t)$ - значення переміщення зовнішнього кільця в момент t , мкм;

a_0 – середнє значення функції $S(t)$ за період, мкм;

a_i – амплітуда коливань, мкм;

$\omega = 2\pi f$ – основна кутова частота складного коливання, рад/с., де f – основна частота періодичного коливання, Гц;

i – номер гармонічної складової;

φ_i - початкова фаза коливань, рад.

Швидкість та прискорення вібрації визначається відповідно першою та другою похідними від переміщення по часу:

$$V = \frac{dS(t)}{dt} = -\sum_{i=1}^{i=k} a_i \omega i \sin(\omega i t + \varphi_i); \quad (1)$$

$$W = \frac{d^2 S(t)}{dt^2} = -\sum_{i=1}^{i=k} a_i \omega^2 i^2 \cos(\omega i t + \varphi_i) \quad (2)$$

Вібрація підшипників традиційно вимірювалась за параметром прискорення. Проте в теперішній час з'явилась тенденція до переходу на вимірювання по параметру швидкості, оскільки віброшвидкість прийнята в якості основного параметра для оцінки вібрації різного обладнання (електричні машини, турбоагрегати та ін.), комплектуючими виробами якого являються підшипники кочення.

З метою дослідження залежності вібрації підшипника від круглості робочих поверхонь його деталей розглянемо діючу методику вимірювання відхилень нерівностей. В теперішній час у вітчизняній підшипниковій промисловості нормованим параметром відхилень форми і хвилястості являється амплітуда нерівностей. Для її вимірювання використовують кругло міри типу “Таліронд” (Англія), які фіксують максимальне відхилення ($P+V$) по колу та записуючі профілографи вимірюваних поверхонь. Також використовуються прилади “Ондаметр” (Італія), моделей 267 та 243 (заводу “Калібр”), які визначають відповідно середньоквадратичне і середньоарифметичне відхилення нерівностей.

На всіх цих приладах вимірюється амплітуда відхилень. Але високочастотні складові спектру нерівностей мають амплітуду 0,01...0,03 мкм, що є меншою або співвимірною з інструментальною похибкою приладів. Ці досить незначні відхилення не відображаються на профілографах і тому не можуть контролюватися кругло мірами.

Таким чином, існуючий метод вимірювання не виявляє високочастотних складових спектра, тобто хвилястості, яка є однією з причин вібрації підшипника. Крім того, покази перерахованих приладів складно спів ставити з результатами контролю вібрації зібраного підшипника.

З метою виявлення відповідності між результатами вимірювання вібрації зібраного підшипника і вимірюваннями відхилень від круглості поверхонь кочення за одним параметром, тобто за швидкістю або прискоренням, проведено наступне дослідження.

Через відсутність динамічних хвилемірів безпосередньо порівняти покази приладів було неможливо. Тому прийнята наступна методика дослідження:

- вимірювання радіальної вібрації зібраних підшипників за прискоренням;
- визначення розрахунковим шляхом вібрації зібраних підшипників за швидкістю;

ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

- вимірювання амплітуди відхилень від круглості робочих поверхонь деталей розібраних підшипників і проведення гармонічного аналізу;
- визначення розрахунковим шляхом швидкості, тобто першої похідної від амплітуди відхилень нерівностей окремих деталей;
- визначення розрахунковим шляхом швидкості і прискорення вібрації зібраних підшипників;
- порівняння результатів вимірювання швидкості та прискорення вібрації зібраних підшипників, отриманих при вимірюванні відхилень від круглості окремих деталей.

Вимірювання радіальної вібрації зібраних підшипників.

Вимірювання проводились на привідній установці КВП-1М з віброперетворювачем Д-14 і вібровимірювальним приладом ИШВ-1 з частотою обертання вала 1500 хв^{-1} та осьовому навантаженні 50 Н.

Вібрація підшипників вимірювалась за прискоренням (дБ) в діапазоні частот 22...11200 Гц з використанням октавних фільтрів. Вимірювання вібрації за швидкості за допомогою приладу ИШВ-1 у вказаному діапазоні частот обмежено верхньою границею частотного діапазону (2000 Гц). Тому вібрація підшипників по швидкості визначалась розрахунковим шляхом.

Визначення вібрації зібраних підшипників за швидкістю.

По-перше, за допомогою експериментальних даних L_w (дБ) розраховувалось абсолютне значення швидкості прискорення вібрації підшипників W_n за формулою:

$$W_n = W_0 \cdot 10^{L_w/20},$$

де $W_0=300$ – нульовий рівень прискорення, мкм/с^2 ;

L_w – вібрація зібраного підшипника по прискоренню, дБ.

Після чого обраховуємо абсолютне значення віброшвидкості підшипника з урахуванням відношення між швидкістю та прискоренням в кожній октавній смузі частот:

$$V_n = \frac{W_n}{2\pi f_0} \quad (4)$$

де f_0 – центральна частота октавної смуги.

Гармонічний аналіз відхилень від круглості.

Після контролю вібрації підшипники були розібрані і виміряні відхилення від круглості робочих поверхонь окремих деталей і проведений гармонічний аналіз цих відхилень на приладі “Талісена-1” з ЕОМ “Талінова” фірми “Ренк-Тейлор-Хобсон” (Англія).

При вимірюванні кілець і шариків визначались значення амплітуд для гармонік в інтервалі від 2 до 128. Доріжки кочення кілець вимірювались в двох перерізах: по дну жолоба і під кутом контакту підшипника, а кульки – в трьох довільних перерізах. Для розрахунку приймалось середньоарифметичне значення амплітуд.

Визначення швидкості, тобто першої похідної від амплітуди відхилень нерівностей окремих деталей.

При обертанні підшипника під впливом відхилень від круглості поверхонь кочення кожної деталі в підшипнику виникають періодичні коливання. Амплітуду швидкості і прискорення цих коливань можна виразити з формул (1) та (2):

- Максимальна амплітуда швидкості:

$$V_{\max} = \sum_{i=2}^{i=128} a_i \omega_i \quad (5)$$

- Максимальна амплітуда прискорення:

$$W_{\max} = \sum_{i=2}^{i=128} a_i \omega_i^2 i^2$$

Формулу (4) перетворимо, використовуючи залежність $\omega=2\pi f = \frac{2\pi n}{60}$, де n – частота обертання вимірюваної деталі за хвилину.

$$\text{Отже } V_{\max} = \sum_{i=2}^{i=128} \frac{a_i n \pi i}{30}.$$

Оскільки вібровимірювальна апаратура яка використовується визначає діюче, тобто середньоквадратичне значення коливальної величини за період [2], то в розрахунках діюче значення амплітуди швидкості для кожної деталі і для підшипника в усіх октавних смугах частот розраховувалось за формулою:

$$V_g = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_{\max}^2(t) dt} = 0.707 \sum_{i=k}^{i=P} \frac{a_i n \pi i}{30} \quad (6)$$

ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

Частота вібрації зібраного підшипника, викликана відхиленнями від круглості його деталей, визначається кількістю хвиль, проходячих за одиницю часу відносно будь-якої нерухомої точки відліку, наприклад на сепараторі, тобто залежить від номера гармонік i та від частоти оберту деталей підшипника $n_{к(с)}$ відносно сепаратора:

$$f = \frac{in_{к(с)}}{60} \quad (7)$$

При визначенні частот обертання деталей відносно сепаратора $n_{к(с)}$ для підшипника як планетарного механізму застосований метод перетвореного механізму, який заключається в тому, що системі сателітів, тобто кулькам, надають кутову швидкість $(-\omega_c)$ і механізм розглядають при зупиненому водилі – сепараторі. Результаті розрахунків проводився за наступними формулами:

Частота обертання зовнішнього кільця відносно сепаратора дорівнює частоті обертання сепаратора n_c :

$$n_{н(с)} = n_c = \frac{d + D}{2} - 2R_{ш} \cos \alpha \cdot n_c,$$

де D і d – зовнішній та внутрішній діаметри підшипника, мм; $R_{ш}$ – радіус кульки; α – кут контакту підшипника при осьовому навантаженні, град.; n_c – абсолютна частота обертання внутрішнього кільця, $хв^{-1}$;

Частота обертання внутрішнього кільця відносно сепаратора $n_{в(с)}$ дорівнює різниці абсолютних частот обертання внутрішнього кільця n_v та сепаратора n_c

$$n_{в(с)} = n_v - n_c,$$

Частота обертання кульок відносно сепаратора $n_{ш(с)}$ складає:

$$n_{ш(с)} = \frac{-\frac{D+d}{4} - R_{ш} \cos \alpha}{R_{ш}} \cdot n_{в(с)}.$$

Результати розрахунку частот обертання деталей підшипників відносно сепаратора при $n_v=1500$ $хв^{-1}$ та $\alpha=12^\circ$ подані в таблиці 1.

Таблиця 1

Підшипник	D	d	R _ш	Кількість кульок	n _{в(с)}	n _{н(с)}	n _{ш(с)}
	мм				хв ⁻¹		
200	30	10	2,976	6	968	532	2305
210	90	50	6,635	10	883	617	4003

Номера гармонік i_s відповідні граничним частотам f_n та f_v октавних смуг, по яких вимірювалась вібрація підшипників, визначались за формулою (7) з використанням значень $n_{к(с)}$ з таблиці 1.

Після впровадження в підшипниковій промисловості динамічних хвилемірів та накопичення статистичних даних необхідно ввести нормування відхилень від круглості поверхонь кочення за швидкістю. Впровадження в підшипниковій промисловості динамічних хвилемірів дозволить ефективно та продуктивно контролювати якість деталей, відбракувати деталі з підвищеним вібраційним впливом та знизити рівень вібрації підшипників які випускаються.

Інформаційні джерела

1. Прилуцкий В. А. Технологические методы снижения волнистости поверхностей. – М.: Машиностроение.-1978. 133с
2. Дьяченко П. Е., Вайнштейн В. Э., Грозинская З. П. Методы контроля и стандартизации волнистости поверхности. М., Стандартгиз, 1962.
3. Марчук В. І., Заблоцький В. Ю., Кайдик О. Л. Вплив параметра хвилястості доріжки кочення на віброакустичні характеристики конічних роликотпідшипників. Тези доповідей Першої Міжнародної науково-технічної конференції “Машинобудування та металообробка – 2003”. – Кіровоград: КДТУ, 2003. – С. 146-148.
4. Дунин-Барковский И.В., Карташева А.И. Измерения и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности. – М.: Машиностроение, 1978. 232с.