

В.І. Марчук, д.т.н., проф.
С.А. Мороз, к.т.н., ст. викл.
А.А. Ткачук, аспір.

Луцький національний технічний університет

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ КІЛЕЦЬ РОЛИКОВИХ ПІДШИПНИКІВ ІНСТРУМЕНТОМ ПРУЖНОЇ ДІЇ

В роботі виведено аналітичні залежності, що описують динамічну модель процесу вигладжування функціональних поверхонь кочення кілець роликових підшипників з використанням інструменту пружної дії. За допомогою отриманих залежностей з'являється можливість прогнозувати кінцеві параметри хвилястості поверхонь в результаті обробки на вигладжувальних операціях.

Вступ. Постановка проблеми. Надійність та довговічність роботи машин та механізмів залежить від якості поверхневого шару підшипників. У зв'язку з інтенсифікацією та прискореним розвитком експлуатаційних процесів, збільшенням швидкостей переміщення робочих органів, підвищенням температур і тиску, роль якості поверхневого шару значно зростає. Зв'язок характеристик якості поверхневого шару з експлуатаційними властивостями деталей свідчить про те, що оптимальна (з точки зору підвищення експлуатаційних властивостей деталей) поверхня має бути досить твердою, повинна мати стискуючі залишкові напруження, дрібнодисперсну структуру, згладжену форму мікронерівностей з відносно великою площею опорної поверхні.

Викладення основного матеріалу. Параметри якості під час обробки вигладжувальним інструментом пружної дії значною мірою залежать від тиску в точці контакту «поверхня–індентор», який визначається параметрами заготовки та індентора (радіус кривизни, початкова шорсткість заготовки) і сили Q прикладеної до індентора. В нашому випадку прикладено до індентора силу Q забезпечує гідростатичний тиск робочої рідини Y_0 , що має ступінь стиску c (рис. 1).

Якщо радіус заготовки не залежить від кута φ , тобто $\rho(\varphi) = \text{const} = \rho_{\text{ном}}$ – немає відхилення від заокругленості, то величина Q визначається значенням попередньо заданого гідростатичного тиску Y_0 , отриманого під час налаштування системи. Тоді, в процесі обробки виконується рівняння $Q = Q_{\text{зад}} = \text{const}$ і в результаті забезпечується стабільність формування параметрів якості поверхневого шару по всій поверхні заготовки. Це ідеальний випадок.

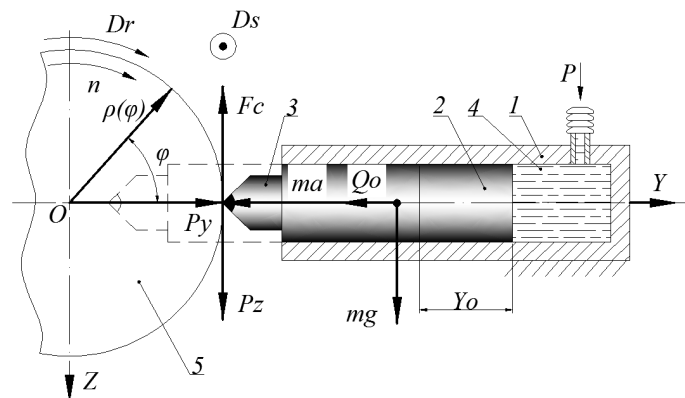


Рис. 1. Схема вигладжування зовнішніх функціональних поверхонь кілець роликових підшипників: 1 – корпус інструменту; 2 – поршень; 3 – індентор; 4 – робоча рідина; 5 – заготовка

На реальних функціональних поверхнях виникають нерівності з різними кроками та амплітудою відхилень. Переміщення по робочих поверхнях описується складною періодичною функцією у вигляді ряду Фур'є, яка складається з простих гармонічних коливань із частотами, кратними основній.

Усі переміщення, спричинені недосконалістю оброблення робочих поверхонь, особливо хвилястістю, що виникає під час точіння й остаточно формується на кінцевих операціях. Реальний профіль можна зобразити за допомогою графічної інтерпретації зміни геометричних параметрів, які впливають на робочі поверхні, що відповідає полярній діаграмі. Діаграму можна подати у вигляді замкненого контуру L , який

в полярній системі координат описується радіусом-вектором ρ , що залежить від полярного кута φ . В даному випадку аргументом є $x = \varphi$, а функцією – $\rho(\varphi) = f(x)$ [1].

Контур L є ідеальною формою, яку повинно набути кільце підшипника після виготовлення (рис. 2). Проте мають місце недосконалості (відхилення форми, хвилястість, шорсткість), що утворюються під час виготовлення кілець підшипників. Серед вказаних недоліків варто виділити хвилястість. Попередніми дослідженнями [3] встановлено, що саме цей параметр відіграє важливу роль у формуванні експлуатаційних характеристик. Величина хвилястості, яку можна охарактеризувати як відхилення від базового контуру, та її порядок здійснюють безпосередній вплив на рівень вібрації й шуму підшипника, а отже, і на експлуатаційні характеристики.

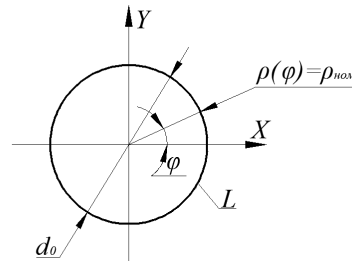


Рис. 2. Контур L , що описується рядом Фур'є, всі гармоніки якого мають нульові амплітуди (наявна лише постійна складова $a_0 = d_0$)

Ряд Фур'є, використаний для математичного опису контуру L , має вигляд:

$$\rho(\varphi) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \sin(k\varphi + \psi_{0k}), \tag{1}$$

де a_0 – деяке постійне значення радіус-вектора; k – номер гармоніки; A_k – амплітуда k -ої гармоніки; ψ_{0k} – початкова фаза гармоніки.

Співвідношення $\rho(\varphi) = \text{const}$ порушується під час вигладжування реального профілю при обробці поверхонь обертання. Прикладом циклічної зміни геометричних параметрів обертових поверхонь є кулачковий механізм, який виникає в результаті похибки форми поперечного перерізу заготовки (хвилястість), що виникає на попередніх операціях технологічного процесу механічної обробки. Ці фактори викликають переміщення вигладжувача вздовж осі Y та порушують динамічну рівновагу процесу, оскільки змінюється нормальна сила вигладжування Q , а отже і тиск в точці контакту. Таким чином, фактичний тиск в зоні контакту «поверхня–індентор» визначається при одному значенні Q за законами зміни профілю деталі в поперечному перерізі, швидкості його обертання та динамічними властивостями пружного інструменту.

Розрахункова схема (рис. 1) відповідає за принципом дії аксіальному кулачковому механізму, де індентор 3 з поршнем 2 – є штовхачем із гідравлічним силовим замиканням, а оброблювана заготовка 5 – плоский кулачок.

Головна мета при розрахунку кулачкових механізмів – визначення профілю кулачка для забезпечення певного закону руху штовхача. При цьому до стабільності тиску в точці контакту «поверхня кулачка–штовхач» регламентованих вимог немає.

Під час динамічного розрахунку інструменту пружної дії для вигладжування вирішується зворотне завдання: за фактично відомим профілем заготовки 5 потрібно визначити закон руху поршня 2 з індентором 3 при заданій динаміці інструменту. При цьому необхідно вирішити такі завдання:

- визначити необхідну умову забезпечення постійного контакту індентора та поверхні, для уникнення відриву та ударної дії інструменту на заготовку;
- виявити діапазон швидкостей вигладжування (V_{\min}, V_{\max}) або (n_{\min}, n_{\max}) в межах якого буде забезпечено сталість сили вигладжування Q в регламентованому діапазоні (Q_{\min}, Q_{\max}), який необхідно витримувати з метою формування параметрів якості поверхневого шару в заданих інтервалах з необхідним рівнем надійності.

В роботі [5] наведено приблизне вирішення такого завдання, проте без врахування пружно-пластичної деформації в області контакту та сил тертя, які присутні в процесі вигладжування. Згідно зі схемою (рис. 1), профіль, що оброблюється можна описати функцією $\rho = f(\varphi)$. Координата Y визначає положення індентора вздовж осі. Прискорення вигладжувача визначається рівнянням:

$$\ddot{y}(t) = \omega^2 f''(\varphi) = \omega^2 f''(\omega t), \tag{2}$$

де $y(t) = f(\omega t)$ – закон переміщення вигладжувача; $\omega = 2\pi n$ – кутова швидкість обертання заготовки; n – кількість обертів за хвилину.

При дотриманні умови про постійний контакт вигладжувача з оброблюваною поверхнею має місце рівняння:

$$f(\omega t) = f(\varphi) = p, \tag{3}$$

тобто закон руху вигладжувача вздовж осі Y повністю визначається формою профілю поперечного перерізу оброблюваної заготовки (ряд Фур'є для математичного опису контуру L).

Постійний контакт обробки забезпечується за виконання умови динамічної рівноваги відповідно до рівняння Даламбера:

$$P_y + Q - M_{\ddot{y}} = 0, \tag{4}$$

де P_y – реакція заготовки на індентор; $Q = c(y + Y_0)$ – тиск, що діє на поршень; $M = (m + m_{pc} / 3)$ – приведена маса рухомих частин інструменту.

Для того, щоб індентор ніколи не відривався від поверхні повинно виконуватись таке рівняння: $P_y \geq 0$. Тоді для граничного випадку $P_y = 0$ маємо:

$$M\ddot{y} \geq Q. \tag{5}$$

З врахуванням (2) вираз (4) набуде вигляду:

$$-M\omega^2 f''(\omega t) \leq Q + cy, \tag{6}$$

де Q – зусилля, що створюється гідростатичним тиском при $y = 0$ (забезпечується налаштуванням з початком обробки), c – ступінь стиску рідини.

Відповідної до (6) можна отримати умову забезпечення сили вигладжування в заданих межах $Q \in (Q_0 \pm \Delta Q)$:

$$Q_0 - \Delta Q \leq Q_0 + cf(\omega t) + M\omega^2 f''(\omega t) \leq Q_0 + \Delta Q. \tag{7}$$

Стабільне забезпечення параметрів якості поверхневого шару при обробці потребує максимально можливого врахування всіх факторів, до яких відносяться геометричні характеристики похибок поперечного перерізу заготовки, сили тертя та в'язкого опору в зоні оброблення.

Запропоновано модель процесу в вигляді розрахункової схеми (рис. 3), що включає в себе: інструмент для вигладжування, що складається з корпусу 1, рухомого поршня 2 з індентором 3, який притискається до заготовки 4 тиском створеним рідиною 5 з ступенем стиску c та силою $Q_0 = cY_0$. Номінальний переріз заготовки має форму кола 6 радіусом ρ_0 . Фактичний переріз заготовки представлено у вигляді хвилястої кривої, яка має максимальну висоту W_{max} , кутовий крок хвилі φ_s , а номінальний профіль перерізу 6 є середньою лінією m_w хвилястості, що характеризує фактичний поточний радіус заготовки $\rho(\varphi)$, 7 хвилястість заготовки.

В розрахунковій схемі передбачено дію таких сил:

$Q_0 = cY_0$ – номінальне (задане) значення сили вигладжування;

Q – результуюча сила дії індентора на поверхню в точці контакту;

$m\ddot{y}$ – сила інерції рухомих частин інструменту;

P_y – сила реакції заготовки на індентор;

\overline{P}_z – сила опору вигладжуванню;

\overline{P} – результуюча сила вигладжування;

mg – маса рухомих частин інструменту;

$\overline{N}_1, \overline{N}_2$ – сила реакції на опорах поршня;

$\overline{F}_1, \overline{F}_2$ – сила тертя ковзання, що виникає при русі поршня;

$n\dot{Y}$ – сила в'язкого опору, пропорційна швидкості руху поршня.

Величина реакції N_1 та N_2 визначається за умови рівноваги поршня 2:

$$\begin{cases} N_1 = \frac{(L+h)P \sin \gamma}{L} \\ N_2 = \frac{hP \sin \gamma}{L} \end{cases}. \tag{8}$$

Якщо перемножити коефіцієнти N_1 та N_2 на коефіцієнт тертя f , отримаємо: $F_1 = fN_1$ і $F_2 = fN_2$.

Критичний кут тиску $\gamma_{кр}$ визначається за умови заклинювання поршня:

$$tg \gamma_{кр} = \frac{1}{f(1 + \frac{2h}{l})}. \tag{9}$$

Аналіз розрахункової схеми дозволяє стверджувати, що модель процесу ППД зовнішніх циліндричних поверхонь представляє собою нелінійну коливальну систему з одним ступенем вільності, яка виконує вимушені коливання за наявності сил в'язкого опору та тертя.

Джерелом збурень є залежність радіуса оброблюваної поверхні від кута φ , тобто функція $\rho(\varphi)$, джерелом якої є відхилення радіуса нормального перерізу оброблюваної поверхні від номіналу, які отримані під час попередньої обробки, що можна представити за допомогою ряду Фур'є.

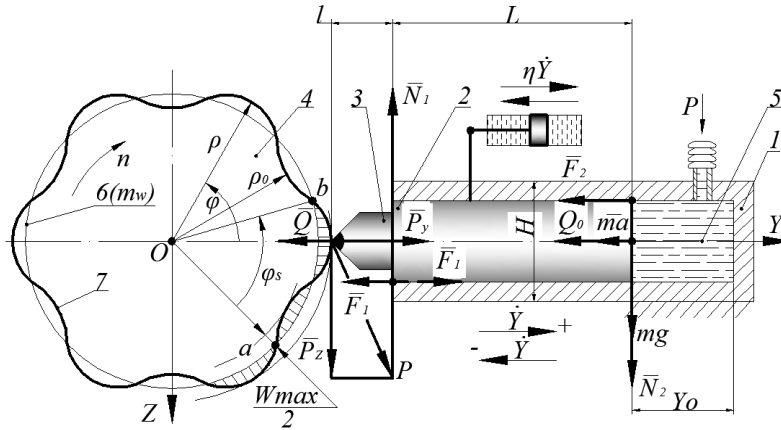


Рис. 3. Математична модель процесу вигладжування зовнішніх циліндричних поверхонь, що мають хвилястість, яка описується рядом Фур'є

Теорія коливань систем з одним ступенем вільності вивчена на достатньо високому рівні та розглядає різні випадки, до яких можна віднести вільні та вимушені коливання, коливання при в'язкому опорі за наявності сил тертя. Без врахування можливості зміни маси отримаємо такий вид рівняння руху системи з одним ступенем вільності:

$$m\ddot{y} + F(y, \dot{y}, t) = 0, \tag{10}$$

де $F(y, \dot{y}, t)$ – це наявність у рівнянні сил залежних від переміщення (сили пружності) $F(y)$, від швидкості (сили в'язкого опору) $F(\dot{y})$, та збурюючі сили $F(t)$, що залежать від часу.

Потрібно зважати, що для нелінійних систем принцип накладання використовувати не можна, тобто збільшувати в 2 рази силу збурення, тому що відповідні переміщення нелінійної системи обов'язково будуть подвоюватись. В загальному випадку нелінійні коливання не є гармонічними і їх частоти змінюються залежно від амплітуди. Але з метою спрощення вирішення технологічних завдань цим зазвичай нехтують, тим самим знижуючи рівень точності.

Безумовно, при цьому необхідно враховувати специфічні особливості обробки вигладжуванням реальних поверхонь. Під час вигладжувального оброблення поверхонь, що мають хвилястість, на інструмент як коливальну систему будуть діяти вимушені коливання, тобто коливання, що викликає сила збурення $P = P(t)$.

З врахуванням співвідношення $\omega_0^2 = \frac{c}{m}$, рівняння вимушених коливань поршня без врахування сил тертя та в'язкого опору матиме вигляд:

$$\ddot{Y} + \omega_0^2 Y = \frac{P(t)}{m}. \tag{11}$$

Формулу (11) прийемо за основу. До неї наводяться диференціальні рівняння коливань будь-якої механічної системи з одним ступенем вільності, за відсутності дисипативних сил. Якщо врахувати наведену силу збурення $P(t) = cf(t)$, то отримаємо такий вигляд даного рівняння:

$$\ddot{Y} + \omega_0^2 Y = \frac{cf(t)}{m}. \tag{12}$$

Описане рівняння динаміки процесу вигладжування інструментом пружної дії більш зручне, адже при обробці поверхні вихідні відхилення від заокругленості утворюють саме кінематичні збурення $f(t)$, наприклад, хвилястість W_{max} з кроком $\varphi_0\rho_0$ (рис. 3).

При врахуванні в'язкого опору рівняння (12) вимушених коливань матиме вигляд:

$$\ddot{Y} + 2\dot{Y} + \omega_0^2 Y = \frac{cf(t)}{m}. \tag{13}$$

Оскільки реальний профіль оброблюваної поверхні 8 (рис. 3) є неперервною диференційною функцією, то його можна представити у вигляді суми синусоїд шляхом розкладу в ряд Фур'є. Тоді для кожної гармоніки величина $f(t)$ буде гармонічним збуджуючим коливанням, а $P(t) = cf(t)$ – гармонічною збуджуючою силою. Для даного випадку вона виражається:

$$P(t) = P_0 \sin(\omega t) = \frac{cf_0}{m} \cdot \sin(\omega t). \quad (14)$$

а встановлені коливальні рухи поршня будуть розв'язком рівняння (14):

$$Y = a \sin(\omega t - \gamma), \quad (15)$$

де a та γ :

$$a = \frac{Y_{cm}}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + \frac{4\omega^2 n^2}{\omega_0^4}}}; \quad (16)$$

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{2\omega n}{\omega_0^2 - \omega^2}, \quad (17)$$

де

$$Y_{cm} = \frac{P_0}{c} = \frac{P_0}{m\omega_0^2}. \quad (18)$$

Рівняння (18) являє собою амплітудно-частотну характеристику коливань вигладжувального інструменту.

Висновок. Виведені аналітичні залежності, які описують динамічну модель процесу вигладжування з використанням інструменту пружної дії дають можливість встановити відносний рух вигладжувального інструменту щодо заготовки, таким чином, можна прогнозувати кінцеві параметри хвилястості кілець роликових підшипників в процесі оброблення функціональних поверхонь на закінчувальних операціях.

Отже, використовуючи вище описаний математичний апарат, існує можливість теоретичного визначення “критичних” гармонік, що здійснюють максимальний вплив на експлуатаційні характеристики підшипників.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Ден-Гартог Дж. П. Механические колебания / Ден-Гартог Дж.П. ; пер. А.Н. Обморшева. – М. : Гос. изд-во физико-математической литературы, 1960. – 580 с.
2. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории колебаний и удара / Я.Г. Пановко. – 3-е изд., доп. и перераб. – Л. : Машиностроение (Ленингр. отд-ние), 1976. – 320 с.
3. Струтинський В.Б. Математичне моделювання процесів та систем механіки : підручник / В.Б. Струтинський. – Житомир : ЖІТІ, 2001. – 612 с.
4. Тимошенко С.П. Колебания в инженерном деле / С.П. Тимошенко, Д.Х. Янг, У.Уивер ; пер. с англ. Л.Г. Корнийчука ; под ред. Э.И. Григолюка. – М. : Машиностроение, 1985. – 472 с.
5. Яблонский А.А. Курс теоретической механики : учеб. для втузов. Ч. 2. Динамика / А.А. Яблонский. – 6-е изд., испр. – М. : Высшая шк., 1984. – 422 с.
6. Яблонский А.А. Курс теории колебаний / А.А. Яблонский, С.С. Норейко. – М. : Высшая шк., 1966. – 256 с.

МАРЧУК Віктор Іванович – доктор технічних наук, професор, завідувачий кафедрою Приладобудування Луцького національного технічного університету.

Наукові інтереси:

– технологічне забезпечення параметрів якості поверхонь обертання та експлуатаційних властивостей деталей підшипників в умовах переналагоджувального підшипникового виробництва.

МОРОЗ Сергій Анатолійович – кандидат технічних наук, старший викладач Луцького національного технічного університету.

Наукові інтереси:

– використання зміцнювально-вигладжувальної технології для забезпечення параметрів якості робочих поверхонь деталей приладів.

Тел.: (066)438-04-98.

E-mail: serg_moroz@i.ua

ТКАЧУК Анатолій Анатолійович – аспірант кафедри Приладобудування Луцького національного технічного університету.

Наукові інтереси:

– підвищення рівня зносостійкості функціональних поверхонь кілець роликів підшипників за допомогою зміцнювально-вигладжувального оброблення.

Тел.: (096)735–85–72.

E-mail: t_toly@ukr.net

Подано 12.05.2011

