УДК 621.822:681.2:369.64
В.Д.Чалий
Луцький національний технічний університет

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ КІЛЕЦЬ РОЛИКОПІДШИПНИКІВ ПРИ БЕЗЦЕНТРОВОМУ ВРІЗНОМУ ШЛІФУВАННІ ЗА ДОПОМОГОЮ СИНТЕЗУ ОПТИМАЛЬНИХ ДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВЕРСТАТА

Викладені принципи синтезу оптимальних властивостей динамічної системи безцентрового врізного шліфування шляхом дослідження взаємозв'язку якісних показників процесу оброблення, супроводжуючого коливального процесу та динамічних властивостей верстата з урахуванням нелінійних зв'язків в зоні різання.

Ключові слова: *якість поверхні, шліфування, стійкість системи, оптимальні динамічні властивості верстата.*

Підвищення вимог до якості підшипників, розширення виробництва малошумних та експортних підшипників невеликих партій з широкою номенклатурою типорозмірів і серій обумовлює необхідність вдосконалення виробничих процесів, засобів технологічного та метрологічного оснащення, використання прогресивних форм і методів організації виробництва, методів адаптивного контролю, та керування технологічними процесами для забезпечення високого рівня технологічної гнучкості автоматизованого підшипникового виробництва.

З іншого боку підвищення організаційної та технологічної гнучкості підшипникового виробництва за рахунок впровадження автоматизованих систем проектування й керування викликає необхідність підвищення рівня автоматизації виробництва, зростання техніко-економічних показників автоматизованих верстатних комплексів, гнучких виробничих систем, прогресивної технології, інструмента, оснащення та спорядження з метою суттєвого підвищення й стабілізації показників якості підшипників, їх експлуатаційних характеристик і, на цій основі, забезпечення конкурентно-спроможності продукції підшипникового виробництва як на внутрішньому, так і на міжнародному ринку [4].

Таким чином пошук шляхів підвищення точності та якості механообробки деталей підшипників, що базується на розкритті закономірностей і взаємозв’язків конструктивно-технологічних чинників з показниками якості та експлуатаційними характеристиками робочих поверхонь деталей підшипників, вдосконаленні існуючих і розробці сучасних технологічних методів, засобів автоматизації контролю й адаптивного керування технологічними процесами виготовлення роликопідшипників є актуальною проблемою машинобудування.

Якість підшипника та його експлуатаційні характеристики, такі як віброактивність, шумність, точність, надійність, довговічність й інші, залежать від параметрів мікротопографії поверхонь кочення та фізико-механічних властивостей поверхневого шару робочих та монтажних поверхонь [2, 4].

Проблема забезпечення заданої якості робочих поверхонь кілець роликопідшипників при абразивній обробці пов'язана, як правило, із забезпеченням оптимального поєднання технологічних чинників з динамічним станом системи верстат-інструмент-деталь (ВІД) [1, 2, 6,7]. Процес шліфування відбувається в безперервно змінних умовах взаємодії інструменту з оброблюваним матеріалом в зоні різання, які в цілому характеризують нестабільність процесу обробки в часі [5]. Нестабільність різання, яка часто проявляється, призводить до погіршення показників обробки внаслідок збудження в зоні різання надмірного рівня коливань. Особливої актуальності динамічна нестабільність процесів шліфування набуває в умовах автоматичного виробництва. З метою зменшення ймовірності утворення детермінованої вібрації на частотах власних й вимушених коливань зазвичай використовують обмеження режимів різання [2, 6]. Звідси слідує простій висновок про можливість підвищення якості шліфувальної обробки шляхом поліпшення динамічного стану верстата.

Проте, прагнення проектувати найбільш відповідальні вузли системи ВІД з поліпшеними динамічними характеристиками не завжди приводять до бажаного результату. Це пов'язано із здатністю формоутворювальних підсистем верстата утворювати при різанні відмінні від

© В.Д.Чалий

очікуваних динамічні властивості [3]. В статті розглядається один із підходів для забезпечення якості обробки при безцентровиму врізному шліфуванні робочих поверхонь кілець роликопідшипників на основі синтезу оптимальних динамічних властивостей формоутворювальних підсистем з урахуванням їх нелінійної взаємодії через зону різання.

Відомо, що коливальний процес в класичному розумінні є відображенням реакції динамічної системи на її збудження. Важливою систематичною складовою коливальних рухів, як показали дослідження, є власні коливання. Параметри власних коливань визначаються пружними, інерційними, дисипативними характеристиками елементів механічної системи верстата, процесу різання та зв'язків між ними. Проміжною ланкою, що дозволяє пов'язати параметри коливального процесу і характеристики механічної системи, є динамічні властивості верстата - схильність до утворення стійких рухів у вигляді певних коливань, нечутливість до збудження коливань в певному діапазоні частот, наявність резонансних й анти-резонансних областей динамічної взаємодії підсистем та інші.

З метою розкриття механізму взаємодії формоутворювальних підсистем звернемося до моделі рухів інструменту та деталі при безцентровому врізному шліфуванні. Вона побудована на основі врахування особливості процесу шліфування, яка полягає в наявності високої питомої ваги роботи тертя в загальній роботі шліфування, та має вигляд:

$$\begin{cases} m_1\ddot{x}_1 + c_{e1}\dot{x}_1 + p_{e1}x_1 + c\left(1-\mu_1 x_1^2\right)\left(\dot{x}_2+\dot{x}_4\right)=0, \\ m_2\ddot{x}_2 + c_{e2}\dot{x}_2 + p_{e2}x_2 + p\left(1-\mu_2 x_2^2\right)\left(x_1+x_3\right)=0, \\ m_3\ddot{x}_3 + c_{e3}\dot{x}_3 + p_{e3}x_3 + c\left(1-\mu_3 x_3^2\right)\left(\dot{x}_2+\dot{x}_4\right)=0, \\ m_4\ddot{x}_4 + c_{e4}\dot{x}_4 + p_{e4}x_4 + p\left(1-\mu_4 x_4^2\right)\left(x_1+x_3\right)=0. \end{cases}, \qquad (1)$$

де m_i, c_{ei}, p_{ei} - еквівалентні параметри підсистем інструменту ($i=1, 2$) та деталі ($i=3, 4$); c, p - коефіцієнти, що відображають характеристики контактної взаємодії абразивного круга з кільцем; μ_i - коефіцієнти нелінійного зв'язку збуджуючих сил із зміною швидкості відносного ковзання інструменту з деталлю та їх зближенням.

В узагальненому вигляді кожна з підсистем інструменту та деталі описується двома парами парціальних систем:

- нормальною системою абразивного інструменту, яка за рахунок наявності консольної оправки має згинаючий характер (координата x_1);
- тангенціальною системою абразивного інструменту, що має згинаючо-крутильний характер (координата x_2);
- нормальною згинаючою системою деталі (координата x_3);
- тангенціальною згинаючо-крутильною системою деталі (координата x_4).

Між підсистемами діють направлені зв'язки, які формуються процесом різання. Вони реалізуються у вигляді підйомної сили $c\left(\dot{x}_2+\dot{x}_4\right)$, що має швидкісний зв'язок з відносним рухом інструменту та деталі, й тангенціальної сили $p\left(x_1+x_3\right)$, що має пружний зв'язок по нормальному зближенню поверхонь інструменту та деталі.

Застосування відомих асимптотичних методів [3] до системи (1) дозволяє описати механізм формування рухів в підсистемах й оцінити їх стійкість. Взаємодія підсистем інструменту та деталі як класичної автоколивальної системи можна представити у вигляді схеми, зображеної на рис. 1.

Спираючись на результати досліджень, розкриємо докладніше механізм взаємодії підсистем в умовах їх збудження процесом різання з погляду впливу на динаміку та якість обробки робочих поверхонь кілець роликопідшипників.

© В.Д.Чалий

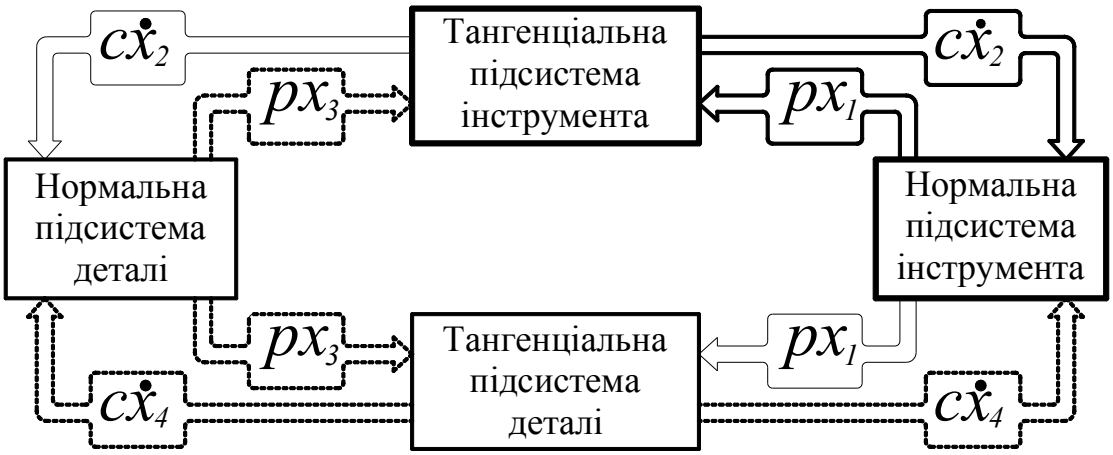

Рис. 1 Схема взаємодії формоутворювальних підсистем при безцентровому врізному шліфуванні робочих поверхонь кілець роликопідшипників.

Розглянемо вплив взаємодії підсистем на стійкість рухів на частоті згину оправки з кругом. Як міра збудження підсистем використовуємо величину похідних коефіцієнтів збудливих сил (cp), яка відображає інтенсивність взаємодії контактуючих поверхонь інструменту та деталі. Залежно від величини збудження динамічна система ВІД шліфування може знаходитися в наступних станах.

Випадок $c=0$, $p=0$. Вказаний стан динамічної системи відповідає відсутності контакту інструменту з деталю, наприклад, на етапі підведення інструменту в зону обробки. В цьому випадку система (1) приймає вид сукупності незв'язаних дисипативних осциляторів, і стан рівноваги динамічної системи на початку координат володіє асимптотичною стійкістю в цілому.

Випадок $(cp)>0$ відповідає процесу обробки. Тут можна виділити окремий випадок, коли робота збуджуючих сил, що вносять енергію до системи ВІД, врівноважується роботою дисипативних сил, які розсіюють її. Позначимо вказаний рівень збудження $(cp)^*$. Залежно від рівня збудження, що діє, по відношенню до величини $(cp)^*$ динамічна система може знаходитися в наступних станах.

Область станів $(cp)<(cp)^*$. Збудженні малі коливання в системі з часом затухають й прагнуть до єдиного стійкого стану - положення рівноваги на початку координат з нульовими амплітудами. Вказаний стан динамічної системи ВІД характеризується домінуванням дисипативного чинника над збуджуючим, та довільні збудження приводять до затухання рухів. Стан рухів системи ВІД може бути описаний характеристиками, що сходяться до початку координат фазовими траєкторіями. Таку динамічну систему ВІД можна охарактеризувати як асимптотично-стійку в цілому, оскільки фазові траєкторії сходяться до стійкого фокусу з центром в положенні спокою системи.

Область станів $(cp)>(cp)^*$. При початкових умовах, відмінних від нуля, рухи в динамічній системі ВІД прагнуть до наростання. Даний випадок відповідає домінуванню збуджуючого чинника над дисипативним. В умовах, коли приплив енергії в систему перевищує граничний рівень $(cp)^*$, в динамічній системі відбувається розвиток коливань, і вона рухається до нового балансного стану - граничного циклу.

Таким чином, динамічна система шліфування може знаходитися в двох різних станах. Слід зазначити, що в обох станах рух зв'язаних підсистем інструменту та деталі підкоряється закону, який визначається дією в області різання направлених зв'язків. Причому, в після граничній області динамічна система шліфування може бути кваліфікована як детермінована автоколивальна система. Разом з тим, якщо врахувати, що збудливий чинник при шліфуванні, що оцінюється

© В.Д.Чалий

величиною (cp), формується за рахунок безлічі випадкових контактів - фрагментів підсистеми круга з оброблюваним матеріалом, то динамічну систему ВІД у до граничній області можна кваліфікувати як стохастичну автоколивальну систему. Рух системи в цьому випадку можна розглядати як безперервний перехідний процес між станами, які обмежені положенням спокою системи та граничними автоколивальними циклами.

Межа, що розділяє вказані стани, може бути описана виразами вигляду $(cp)_j^* = f_j(c_i, p_i, m_i, \omega_j)$, що встановлюють залежність граничного значення збудливого чинника із співвідношенням параметрів формоутворювальних підсистем на автоколивальних частотах ω_j.

Виникнення автоколивань залежить від жорсткості та деформуючої здатності елементів системи, міцності й пластичності оброблюваного матеріалу, виду обробки і режимів різання. Будь-які випадкові збудження (поштовхи), яких в реальних умовах багато, призводить до виникнення власних затухаючих коливань технологічної системи. Це в свою чергу викликає зміну товщини зрізу, й, відповідно, зміну складових сили різання. Якщо зміна сили різання відстає в часі від зміни товщини зрізу, або якщо із збільшенням швидкості різання відбувається зменшення радіальної складової сили різання, то власні затухаючі коливання перейдуть в незатухаючі автоколивання. Ці два чинники - відставання сили різання від зміни товщини зрізу та зменшення сили різання від збільшення швидкості різання - є основними джерелами збудження автоколивань. Для стабілізації технологічних параметрів необхідно знати вплив інтенсивності автоколивань на стійкість інструменту, продуктивність обробки і якість поверхні.

Дослідження показали, що по критерію зв'язаності можна виділити дві області стійкості рухів на частоті згину оправки з кругом (рис. 2). Крива на рисунку являє собою геометричне розміщення крапок, що відповідають значенням межі стійкості рухів. Область значень показника стійкості $\gamma_0^{(1)}$, розташована вище над кривою, відповідає стійкому автоколивальному режиму. Поєднання параметрів динамічної системи ВІД, що знаходяться нижче за криву, відображають нестійкі стохастичні автоколивальні режими.

Розподіл двох областей розташовується при відношенні частот $\omega_{04}/\omega_{01} \approx 0,8$, де ω_{04} - парціальна частота тангенціальної підсистеми деталі, а ω_{01} - парціальна частота нормальної підсистеми інструменту. Вказане значення відношення частот відповідає максимальній схильності системи до збудження детермінованої вібрації на частоті згину інструменту. Крапка з відношенням частот $\omega_{04}/\omega_{01} \approx 1$ визначає найбільш нестійкий стан динамічної системи з високою ймовірністю збудження автоколивань інструменту на частоті згину. Звідси витікає, що з позицій забезпечення необхідної якості обробки робочих поверхонь кілець роликопідшипників при безцентровому врізному шліфуванні доцільно обмежити зв'язаність підсистем областю співвідношень частот $\omega_{04}/\omega_{01} \approx 0,65...0,85$, яка відповідає найбільшому демпфіруванню коливань на частоті згину оправки з кругом.

На основі встановленого механізму взаємодії підсистем інструменту та деталі при різанні сформована стратегія корекції динамічних властивостей системи шліфування по критерію якості обробки. Зміна параметрів формоутворювальних підсистем у бік забезпечення оптимальних динамічних властивостей верстата в зоні різання здійснюється у вигляді динамічної настройки. Її метою є синтез таких динамічних властивостей верстата в зоні різання, який забезпечує мінімізацію схильності системи до утворення детермінованої вібрації на частотах несприятливих видів коливань.

Викладені принципи синтезу оптимальних властивостей динамічної системи шліфування шляхом дослідження взаємозв'язку якісних показників процесу обробки, супроводжуючого коливального процесу та динамічних властивостей верстата з урахуванням нелінійних зв'язків в зоні різання лягли в основу розробки ряду пристроїв корекції динамічних характеристик верстата, що показали добрі результати по забезпеченню якості обробки робочих поверхонь кілець роликопідшипників.

© В.Д.Чалий

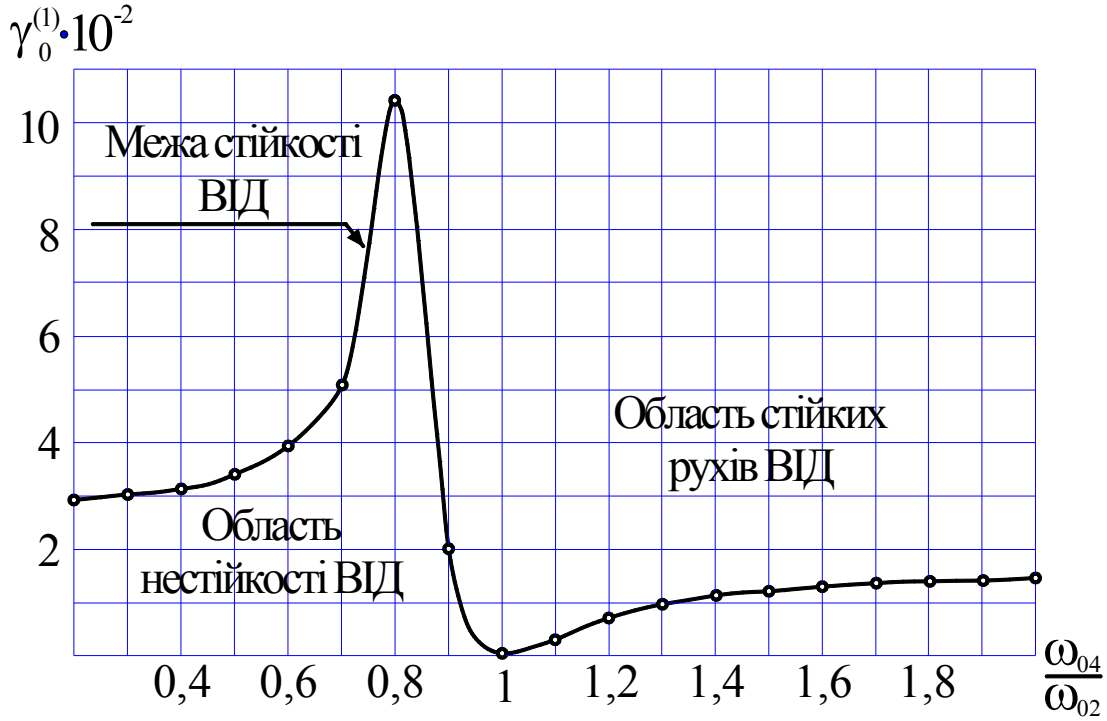

Рис. 2 Вплив взаємозв'язку підсистем інструменту та деталі на стійкість рухів на частоті згину оправки з кругом.

1. Грабченко А.И. Расширение технологических возможностей алмазного шлифования. - Харьков: Высшая школа. Изд-во при Харьковском университете, 1985. – 184с.
2. Прилуцкий В.А. Технологические методы снижения волнистости поверхностей. - М.: Машиностроение, 1978. - 136 с.
3. Кудинов В.А. Динамические расчеты станков (основные положения)//СТИН.-1995, № 8. -с.3-13.
4. Марчук В.І. Технологічні основи забезпечення якості робочих поверхонь кілець роликопідшипників / Автореферат на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук. - Луцьк: РВВ, 2004.-36с.
5. Технологические основы обеспечения и стабилизации качества поверхностного слоя при шлифовании зубчатых колёс: Монография / Под. ред. А.В. Якимова. – Одеса: Астропринт, 2003.
6. Управление процессом шлифования / А.В. Якимов, А.МН. Паршаков, В.И. Свирщев, В.П. Ларшин. – К.: Техніка, 1983. – 184с.
7. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования. – М.: Машиностроение, 1975. – 176с.

© В.Д.Чалий