

Матеріали, изложенные в данной статье являются частью комплексного исследования обработки валков сортового проката. По результатам исследований удалось повысить точность прокатки профиля не только в поперечном сечении, но снизить изгиб изделия в горизонтальной плоскости – серповидность и в вертикальной – коробление.

**Список литературы:** 1. Грановский Г. И. Резание металлов. – М.: Высшая школа, 1982. – 298 с. 2. Шарин Ю.С. Технологическое обеспечение станков с ЧПУ. - М.: «Машиностроение» 1986. - 175с. 3. Лещенко А.И. Экспериментальное исследование и теоретическое обоснование нелинейной характеристики износа режущего инструмента. - Вісник приазовського державного технічного університету №11. – Мариуполь, 2001. – 76 с. 4. Артамонов А. Р. Исследование обрабатываемости высокопрочного чугуна. - М.: «Машиностроение» 1955. - 111с.

Сдано в редакцию 18.05.05  
Рекомендовано д.т.н., проф. Сулов А.Г.

## **МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ БЕЗЦЕНТРОВОГО ШЛІФУВАННЯ ДОРІЖОК КОЧЕННЯ ВНУТРІШНІХ КІЛЕЦЬ РОЛИКОПІДШИПНИКІВ ДЛЯ КЕРУВАННЯ ПАРАМЕТРАМИ МІКРОРЕЛЬЄФУ ОБРОБЛЮВАНИХ ПОВЕРХОНЬ**

**Марчук В.І., Денисюк В.Ю., Чалий В.Д. (ЛДТУ, м. Луцьк, Україна)**

*The model of centerless grinding process of roller bearing inner ring trucks in grinding machines taking into account cinematic and geometry setting parameters for grinding, factors effecting grinding process, surface quality indices and machining efficiency was considered. The dynamic model of low – frequency oscillating processes of trucks centerless grinding technological system to control parameters of machined surface microtopography parameters, is developed.*

Вихідні параметри якості робочих поверхонь кілець роликотішипників такі як точність лінійних і кутових розмірів, відхилення форми, структура і параметри мікрорельєфу, фізико-механічні властивості поверхневого шару від яких залежать експлуатаційні властивості деталей в складі виробу формуються на викінчувальних шліфувальних та доводочних операціях. З точки зору забезпечення точності та якості мікротопографії поверхні (шорсткість, хвилястість) обробка шліфуванням має великі переваги перед обробкою лезовим інструментом [1]. Багатопрохідність і можливість за необхідністю змінювати робочий цикл в напрямку від грубого процесу до більш тонкого є, в цьому відношенні, одним з позитивних факторів.

Другим важливим фактором, який властивий природі шліфування, є тенденція самого процесу формоутворення до автоматичного вирівнювання вихідних похибок форми поверхонь. Тобто має місце саморегулювання процесу формоутворення коли власні відхилення від правильної геометричної форми являються першопричиною такої зміни різальної здатності круга і інтенсивності знімання припуску, яка пришвидшує процес заокруглення деталі. Сама деталь “керує” процесом формоутворення, пришвидшуючи вирівнювання початкових похибок.

Після механічної обробки на токарних операціях в технологічному маршруті виготовлення кілець роликотішипників традиційно виконуються термічні операції, ме-

тою яких є покращення фізико-механічних властивостей матеріалу деталей і досягнення необхідних експлуатаційних показників поверхонь доріжок кочення та монтажних поверхонь. Рівень вдосконалення термічних операцій гартування та відпуску кілець впливає не тільки на показники якості структури матеріалу поверхневих шарів деталей і можливі дефекти макрогеометрії, але і на значення мінімально допустимих припусків, що знімаються на фінішних алмазно-абразивних операціях шліфування і суперфінішу.

Зменшення параметра хвилястості  $W_{max}$  на токарних операціях формоутворення доріжок кочення, а також впровадження прогресивної технології термічної обробки кілець з нагріванням в середовищі захисних газів і з використанням спеціальної методики охолодження кілець дозволяють практично уникнути дефектів макрогеометрії кілець після загартовування. Так для шліфування доріжки кочення внутрішнього кільця конічного роликотримача 7305A.02 припуск на чорнове шліфування становив 0,347 мм, а на чистове шліфування – 0,05 мм. На суперфінішну операцію призначений припуск 0,003–0,002 мм.

Після запропонованої зміни технологічного маршруту на чистовому шліфуванні знімається припуск 0,155 мм, а припуск для суперфінішної операції залишився без зміни.

Враховуючи те, що на суперфінішній операції змінюється тільки параметр шорсткості поверхні з  $Ra$  0,55 до  $Ra$  0,16, то очевидно, що кінцева хвилястість поверхні доріжки кочення забезпечується на операції чистового шліфування, яка виконується на шліфувальному автоматі SWa AGL 125.

Процес шліфування доріжок кочення, як внутрішніх, так і зовнішніх кілець проводиться як багатоступінчаста операція в автоматизованому циклі обробки [3]. Робочий цикл шліфування складається з наступних переходів: 1. Завантаження; 2. Форсована подача (підведення інструменту); 3. Чорнова подача; 4. Чистова подача; 5. Виходжування; 6. Правка круга; 7. Вивантаження. Всі основні переходи шліфування здійснюються за одне встановлення деталі. На переході чорнового шліфування знімається більша частина припуску (0,120 мм), а на переході чистового шліфування і виходжування забезпечуються необхідні значення параметрів якості геометричної структури поверхні. Таким чином скорочується час операції і забезпечується необхідна якість оброблюваної поверхні. З точки зору можливостей керування такий процес є складним для виконання, оскільки на його протікання впливає велика кількість параметрів. Найважливіші фактори, що впливають на цей процес і в кінцевому результаті на формування геометричної структури робочих поверхонь кілець, а також критерії його оцінки показані на рис. 1.

Характерною рисою, що характеризує багатоступінчастість процесу, є диференціація швидкості поперечної подачі  $V_n$  в залежності від зміни припуску на обробку  $\Delta x_0$ .

До кінематичних налаштовуваних параметрів процесу шліфування відносяться:

- швидкість форсованої подачі шліфувального круга на величину проміжку безпеки  $V_{fn}$ ;
- швидкість подачі чорнового шліфування  $V_{n1}$ ;
- швидкість подачі чистового шліфування  $V_{n2}$ ;
- час виходжування  $t_6$ ;



Рис. 1. Фактори впливу, параметри та показники процесу безцентрового візного шліфування доріжок кочення кілець роликопідшипників

- колова швидкість шліфувального круга  $V_k$ ;
- колова швидкість деталі  $V_d$ .

До геометричних встановлюваних параметрів процесу відносяться:

- припуск на чорнове шліфування  $\Delta x_1$ ;

- припуск на чистове шліфування  $\Delta x_2$ ;
- припуск на виходжування  $\Delta x_6$ ;
- величина проміжку безпеки швидкого підведення  $\Delta x_6$ .

Загальний припуск на обробку  $\Delta x_0$  залежить від виду попередньої обробки перед шліфуванням.

Кількість факторів, що впливають на процес шліфування, різко зростає, якщо прийняти до уваги вплив параметрів: шліфувального круга, деталі, верстата, мастильно-охолоджуючої рідини та процесу правки шліфувального круга.

Параметри системи верстат-інструмент-деталь (ВІД) в значній мірі визначаються завданням на обробку, типорозміром кілець і формою обробної поверхні, системою контролю, подачі мастильно-охолоджувальних рідин, правки круга тощо.

До основних критеріїв оцінки якості обробної деталі відносяться:

- якість геометричної структури поверхні (шорсткість, хвилястість);
- точність форми і розмірів;
- властивості поверхневого шару.

Економічна ефективність шліфувальної операції (процесу) в цілому може бути оцінена технологічною чи цикловою продуктивністю і, як наслідок, відносною собівартістю обробки шліфованих деталей.

Під час обробки серії деталей слід додатково прийняти до уваги період стійкості шліфувального круга  $T$  (час між черговими правками круга), що на практиці часто визначається кількістю оброблених деталей або об'єму зрізаного матеріалу за цей час.

Серед характерних параметрів самого процесу шліфування, які визначають причинно-наслідкові зв'язки між налаштовуваними параметрами і результатами процесу, слід назвати: силу різання  $P$  (нормальну  $P_n$  і дотичну  $P_t$ ), потужність різання  $N$ , об'ємну продуктивність  $Q$  та спрацьовування круга [4].

Технологічні особливості перебігу процесу шліфування, зміна різальних властивостей шліфувального круга і пружна податливість системи, які викликають появу нестационарних фаз зміни швидкості подачі інструменту, а також зростаючі вимоги до якості обробки поверхонь внутрішніх кілець роликотідшипників викликають необхідність врахування динаміки процесу обробки.

Починаючи від першого контакту (торкання) шліфувального круга з деталлю подальше переміщення круга  $X_n$  пов'язане зі зніманням припуску на обробку. При цьому виникає сила різання  $P$ , складова якої нормальна сила  $P_n$  викликає появу пружних деформацій системи (переміщення  $x_p$ ). Вказані переміщення змінні в часі і тому приводять до зміни положення зони контакту

$$x_a(t) = x_0(t) - x_p(t) \quad (1)$$

При аналізі динаміки процесу шліфування на перший план виступають два явища. По-перше, нормальна сила шліфування  $P_n$  при стрибкоподібній зміні швидкості врізної подачі круга  $V_n$  зростає із запізненням, залежним від релаксації системи ВІД, а, по-друге, існує можливість виникнення коливань в системі, викликаних наявністю хвилястості або некруглої поверхні деталі і шліфувального круга.

Літературні джерела [5, 6, 7] вказують різні початкові умови при моделюванні динаміки процесу врізного шліфування в залежності від призначення. Проте, до сьогоднішнього дня абсолютно відсутня яка-небудь єдина теорія коливань при шліфуванні. Найчастіше приймається, що збудження коливань при шліфуванні є, перш за все, ре-

зультатом розвитку хвилястості на зовнішній поверхні шліфувального круга або деталі, первинним джерелом якої можуть бути:

- процес правки круга і неминучі при цьому коливання шліфувального круга під впливом правлячого інструменту [6];
- процес різання, який сам по собі генерує коливання, що мають характер білого шуму з широким діапазоном (одночасна участь в процесі великої кількості абразивних зерен, що створюють імпульсні збурення) [5];
- непостійність довжини контакту круга з деталлю через непостійність різальних властивостей на його зовнішній поверхні (наприклад, в результаті мікроспрацювання) [2].

В представлених вище роботах здійснена спроба оцінки динаміки процесу шліфування з відомими граничними умовами. В них були згадані всі основні елементи ВІД не об'єднані в загальну адекватну модель. Тому розробка динамічної моделі процесу врізного шліфування тіл обертання з врахуванням його технологічних особливостей і пружно-масових параметрів системи видається необхідною і актуальною.

У цій моделі автори обмежилися низькочастотними параметрами, тобто такими, частота яких лежить значно нижче резонансної частоти верстата. Такі прийняті передумови виходять з того, що пружні деформації системи ВІД, знімання припуску на обробку і спрацювання круга можуть розглядатися як результат низькочастотних коливань.

Виходячи з прийнятих передумов, розрахункова динамічна схема процесу круглого шліфування на автоматі SWa AGL 125 може бути представлена у вигляді двохмасової системи з пружними та демпфуючими зв'язками (рис. 2).

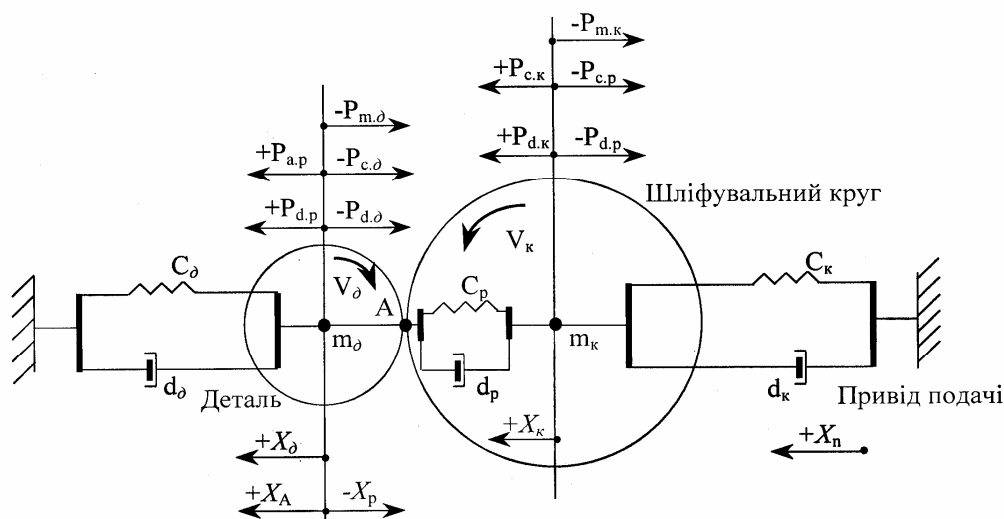


Рис. 2. Розрахункова динамічна схема процесу круглого врізного шліфування на автоматі SWa AGL 125

На схемі прийняті наступні позначення:  $m_d$  – маса деталі і її шпинделя;  $m_k$  – маса круга і його шпинделя;  $c_d$  – приведена жорсткість шпинделя деталі, передньої бабки та їх опорних вузлів;  $c_k$  – приведена жорсткість шпинделя круга та супорта;  $c_p$  – радіальна жорсткість круга;  $d_d$  та  $d_k$  – коефіцієнти демпфування відповідно шпинделів деталі і круга;  $d_p$  – коефіцієнт демпфування круга;  $x_d$  – переміщення деталі;  $x_p$  – радіальне спра-

цьовування круга;  $x_a$  – переміщення зони контакту деталі і круга;  $x_k$  – переміщення круга;  $x_n$  – переміщення супорта круга.

Сили пружності, які виникають в системі, визначаються залежностями:

$$\begin{aligned} P_{c\partial} &= c_{\partial}x_{\partial}(t); \\ P_{cp} &= c_p(x_k(t) - x_p(t)); \\ P_{ck} &= c_k(x_n(t) - x_k(t)). \end{aligned} \quad (2)$$

Сили демпфування в системі:

$$\begin{aligned} P_{d\partial} &= d_{\partial}\dot{x}_{\partial}(t); \\ P_{dp} &= d_p(\dot{x}_k(t) - \dot{x}_p(t)); \\ P_{dk} &= d_k(\dot{x}_n(t) - \dot{x}_k(t)). \end{aligned} \quad (3)$$

Сили інерції:

$$P_{m\partial} = m_{\partial}\ddot{x}_{\partial}(t); \quad P_{mk} = m_k\ddot{x}_k(t). \quad (4)$$

Застосовуючи принцип Даламбера, запишемо рівняння балансу сил:

$$\begin{aligned} P_{m\partial} + P_{c\partial} + P_{d\partial} - P_{cp} - P_{dp} &= 0; \\ -P_{mk} + P_{ok} + P_{dk} - P_{cp} - P_{dp} &= 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Підставивши (2)–(4) в (5), одержуємо рівняння руху мас динамічної системи:

$$\begin{aligned} m_{\partial}\ddot{x}_{\partial}(t) + c_{\partial}x_{\partial}(t) + d_{\partial}\dot{x}_{\partial}(t) &= c_p(x_k(t) - x_p(t)) + d_p(\dot{x}_k(t) - \dot{x}_p(t)); \\ -m_{\partial}\ddot{x}_k(t) + c_k(x_n(t) - x_k(t)) + d_k(\dot{x}_n(t) - \dot{x}_k(t)) &= c_p(x_k(t) - x_p(t)) + d_p(\dot{x}_k(t) - \dot{x}_p(t)). \end{aligned} \quad (6)$$

Для забезпечення зручності аналізу динамічної системи рівняння руху представимо у вигляді, застосувавши перетворення за Лапласом. Тоді рівняння (6) набувають вигляду:

$$\begin{aligned} (m_{\partial}s^2 + d_{\partial}s + c_{\partial})x_{\partial}(s) &= d_p s(x_k(s) - x_p(s)) + c_p(x_k(s) - x_p(s)); \\ (m_k s^2 + (d_k + d_p)s + (c_k + c_p))x_k(s) &= (d_k s + c_k)x_n(s) + (d_n s + c_p)x_p(s). \end{aligned} \quad (7)$$

З балансу сил, які діють на маси динамічної системи, згідно схеми на рис. 2, нормальна сила різання у відповідності до перетворень Лапласа

$$P_n(s) = (d_p s + c_p)(x_k(s) - x_p(s)) = (m_{\partial}s^2 + d_{\partial}s + c_{\partial})x_{\partial}(s). \quad (8)$$

Пружні переміщення елементів верстата, у відповідності з (7) представимо у вигляді:

$$\begin{aligned} x_{\partial}(s) &= G_p(s) \cdot G_{\partial}(s) \cdot (x_k(s) - x_p(s)); \\ x_k(s) &= G_k(s) \cdot x_n(s) + G_A(s) \cdot x_p(s). \end{aligned} \quad (9)$$

де  $G_p(s)$  – передавальна функція нормальної сили;  $G_{\partial}(s)$  – передавальна функція пружного переміщення деталі;  $G_k(s)$  – передавальна функція пружного переміщення

круга;  $G_A(s)$  – передавальна функція зони контакту круга з деталлю. Їх можна представити рівняннями:

$$\begin{aligned}
 G_p(s) &= d_p s + c_p = \frac{P_n(s)}{x_k(s) - x_p(s)}; \\
 G_\partial(s) &= \frac{1}{m_\partial s^2 + d_\partial s + c_\partial} = \frac{x_\partial(s)}{P_n(s)}; \\
 G_k(s) &= \frac{c_k + d_k s}{m_k s^2 + (d_k + d_p)s + c_k + c_p} = \frac{x_{k1}(s)}{x_n(s)}; \\
 G_A(s) &= \frac{d_p s + c_p}{m_k s^2 + (d_k + d_p)s + c_k + c_p} = \frac{x_{k2}(s)}{x_p(s)}.
 \end{aligned} \tag{10}$$

В (10)  $x_{k1}$  та  $x_{k2}$  – складові переміщення круга відповідно від його подачі та впливу радіального спрацьовування:

$$\begin{aligned}
 x_{k1} &= G_k(s) \cdot x_n(s); \\
 x_{k2} &= G_A(s) \cdot x_p(s).
 \end{aligned} \tag{11}$$

Визначаючи з рівнянь (10) переміщення  $x_\partial(s)$  та  $x_p(s)$ , у відповідності до (1) знаходимо повну пружну деформацію системи ВІД в зоні контакту шліфувального круга з деталлю:

$$x_A(s) = x_\partial(s) - s_p(s) = \frac{P_n[G_\partial(s) \cdot G_p(s) \cdot (G_A(s) - 1) - 1] + G_p(s) \cdot G_k(s) \cdot x_n(s)}{G_p(s)(G_A(s) - 1)}. \tag{12}$$

З рівнянь (10) одержуємо також нормальну силу, яка викликає пружну деформацію:

$$P_n = G_p(s)[G_k(s) \cdot x_n(s) + (G_A(s) - 1) \cdot x_p(s)]. \tag{13}$$

Нормальна сила таким чином являє собою похідну від переміщення подачі  $x_p$  уздовж осі  $X$  і викликає появу напружень круга ( $G_p$ ) і верстата ( $G_k$  і  $G_A$ ).

На пружну деформацію  $x_A$  системи ВІД впливають переміщення подачі  $x_n$  і переміщення елементів динамічної моделі процесу шліфування, на характеристики якого впливає зворотній зв'язок між нормальною силою і деформацією. Цей зв'язок може бути керованим в залежності від механізму знімання припуску на обробку деталі і радіального спрацьовування шліфувального круга.

Знаючи пружно-масові і демпфуючі параметри системи ВІД, скориставшись передавальними функціями (10), можна розрахувати частотні характеристики.

Коефіцієнти демпфування  $d$  окремих ланок системи ВІД обчислені за формулою:

$$d_i = \frac{\Psi_d c_i}{2\pi\omega_i}. \tag{14}$$

Коефіцієнт  $\Psi_d$  залежить від матеріалу і для металів приймається приблизно 0,03;  $\omega_i$  – частота власних коливань даної пружно-масової демпфуючої ланки, при якій демпфування є домінуючим, а  $c$  – її жорсткість.

З представлених тут чотирьох частотних характеристик випливає, що мінімальна гранична частота знаходиться вище області частот низькочастотної моделі (близько 10 Гц).

Тому ці часткові передавальні функції з достатньою точністю можуть бути апроксимовані своїми граничними стаціонарними значеннями  $\lim G(s \rightarrow 0)$ . В цьому випадку вказані передавальні функції враховують лише коефіцієнти жорсткості  $c_i$  елементів системи ВІД.

При подальшій заміні передавальних функцій в рівняннях (12) і (13) коефіцієнтами жорсткості при сумісному рішенні одержуємо рівняння нормальної сили шліфування:

$$P_n = \frac{c_p c_d c_k}{c_d c_k + c_d c_p + c_p c_k} (x_n - x_A) = c_c (x_n - x_A), \quad (15)$$

де  $c_c$  – коефіцієнт загальної жорсткості системи ВІД.

Одержані результати і залежність (15) підтверджують важливість врахування пружних властивостей системи.

В результаті теоретичних досліджень математичної моделі отримані частотні характеристики передатних функцій об'єктів технологічної системи безцентрового шліфування робочих поверхонь кілець, які дозволили виявити мінімальну граничну частоту коливань (в межах 10000 Гц), що відповідає високочастотному діапазону. Виведені рівняння для визначення нормальної сили шліфування в залежності від зміни коефіцієнту загальної жорсткості системи ВІД, радіального переміщення шліфувального круга, похибки знімання припуску.

Запропонований підхід до поелементного моделювання технологічної системи формоутворення дозволив використати перспективний принцип модульної побудови загальної математичної моделі шліфування поверхонь кілець з відповідною апаратною реалізацією автоматичного контролю і керування робочим циклом шліфування за параметром сили різання.

**Список літератури:** 1. Грабченко А.И. Расширение технологических возможностей алмазного шлифования. – Харьков: Вища школа. Изд-во при Харьковском университете, 1985. – 184с. 2. Корсаков В.С., Гусев В.Г. Формирование поверхностей шлифуемых прерывистыми абразивными кругами. Известия вузов. – М.: Машиностроение, 1984, – №4. – С. 133 – 138. 3. Марчук В.І., Кайдик О.Л., Заблоцький В.Ю. Вдосконалення системи адаптивного керування точністю на шліфувальному автоматі ME 280 CO // Прогресивні технології і системи машиностроєння: Міжнародний збірник наукових трудов. – Донецьк: Дон НТУ, 2003. Вип. 25. –С. 279-284. 4. Марчук В.І. Моделювання динамічної системи безцентрового врізного шліфування робочих поверхонь роликотідшипників // Наукові нотатки. Міжвузівський збірник (за напрямом “Інженерна механіка”), вип.14, серпень 2004. – Луцьк, 2004. – С. 187-198. 5. Новоселов Ю.К., Гатаркин Е.Ю. Обеспечение стабильности точности деталей при шлифовании. – Саратов: Изд-во Саратовского университета, 1988. – 128с. 6. Управление процессом шлифования / А.В. Якимов, А.Н. Паршаков, В.И. Свирщев, В.П. Ларшин. – К.: Техніка, 1983. – 184 с. 7. Oczos K.E., Burek J. Sterowanie adaptacyjne wielostopniowym cyklem szlifowania wglebnego. Mechanik 66, 1992, 7. – S.237-240.

Сдано в редакцію 07.04.05

Рекомендовано д.т.н., проф. Михайлов А.Н.