

УДК 621. 822:681.2:369.64

В.І. Марчук, І.В. Марчук*Луцький національний технічний університет***ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТОЧНОСТІ ФОРМОУТВОРЕННЯ В ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМАХ ШЛІФУВАННЯ ПОВЕРХОНЬ ОБЕРТАННЯ**

В роботі встановлено, що сумарна похибка оброблення на викінчувальних шліфувальних операціях має комплексний характер, основними складовими якої є: - власна похибка приладів активного контролю, які входять в систему автоматичного розмірного управління; - похибки, викликані температурними деформаціями на всіх етапах формування розмірних параметрів; - похибки, викликані динамічними процесами системи автоматичного управління розмірними параметрами. Підвищити точність розмірних параметрів деталей підшипників кочення можна на основі оптимальної побудови технологічного процесу шліфування на викінчувальних операціях оброблення.

Ключові слова: поверхня, похибка, шліфування.

В.И. Марчук, И.В. Марчук**ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТОЧНОСТИ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ШЛИФОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ ВРАЩЕНИЯ**

В работе установлено, что суммарная погрешность обрабатывания на финишных шлифовочных операциях имеет комплексный характер, основными составляющими которой являются: - собственная погрешность приборов активного контроля, которые входят в систему автоматического размерного управления; - погрешности, вызванные температурными деформациями на всех этапах формирования размерных параметров; - погрешности, вызванные динамическими процессами системы автоматического управления размерными параметрами. Повысит точность размерных параметров деталей подшипников качения можно на основе оптимального построения технологического процесса шлифования на финишных операциях обрабатывания.

Ключевые слова: поверхность, погрешность, шлифование.

V.I. Marchuk, I.V. Marchuk**PROVIDING THE ACCURACY OF FORMAL FORMATION IN TECHNOLOGICAL SYSTEMS SANDING OF SURFACE SURFACES**

In the work it is established that the total error of processing at the final grinding operations has a complex character, the main components of which are: - the intrinsic inaccuracy of the active control devices that enter the automatic size control system; - Errors caused by temperature deformations at all stages of formation of dimensional parameters; - errors caused by dynamic processes in the system of automatic control of dimensional parameters. Increase the accuracy of the dimensional parameters of the components of rolling bearings can be based on the optimal construction of the technological process of grinding at the finishing operations of processing.

Key words: surface, error, grinding.

Визначення параметрів технологічного процесу, які необхідно контролювати з метою ефективного управління цим процесом є складною задачею, що залежить від вимог як до точності, так і від характеру взаємозв'язків між параметрами процесу шліфування [1] та показниками якості оброблених деталей. Тому вибір алгоритму управління і структурної схеми управління точністю оброблення у загальному випадку виконується у наступній послідовності [2].

1. Встановлення причин і діапазону розсіювання розмірних параметрів та умов оброблення.

2. Розроблення математичної моделі процесу шліфування і процесу формування похибки оброблення [3].

3. Аналітичне дослідження процесу шліфування. Визначення параметрів управління. Формування вимог до структури циклу, характеру перебігу процесу, до структурної схеми та точності системи управління процесом.

4. Експериментальне дослідження процесу шліфування з метою комплексного вивчення зв'язків між параметрами технологічної системи та показниками якості оброблення.

5. Розроблення алгоритму управління процесом і системи управляючого контролю для його реалізації.

Складові похибки оброблення. Аналізуючи процес формування похибок оброблення, можна виділити наступні основні складові сумарної похибки Δ_{Σ} оброблення однієї деталі:

похибка Δ_{Π} системи активного контролю, яка визначається як різниця між дійсним розміром деталі в момент подачі команди і заданим розміром;

похибка Δ_θ , зумовлена температурними деформаціями оброблюваної деталі;
похибка Δ_c , зумовлена часом t_c запізнення виконавчої команди на відвід шліфувального круга,

$$\Delta_c = \int_0^{t_c} v_s(t) dt, \quad (1)$$

де v_s – швидкість зняття припуску.

Для оцінки впливу швидкості v_D зміни контрольованого розміру на похибку оброблення доцільно виділити із похибки Δ_{II} складову Δ_{II} , зумовлену часом t_{II} запізнення системи активного контролю, або, іншими словами, час запізнення зміни вимірювального сигналу відносно зміни контрольованого розміру:

$$\Delta_{t_{II}} = \int_0^t [v_D(t) - \frac{1}{i_g} v_{вим}(t)] dt \quad (2)$$

де $v_{вим}$ – швидкість зміни вимірювального сигналу;

i_g – чутливість вимірювальної системи.

Для аналітичного визначення похибок Δ_{II} і Δ_c необхідно знати закономірності зміни швидкості v_s зняття припуску у функції часу оброблення і поточного значення припуску ΔD . Не враховуючи вплив швидкості зміни температурних деформацій деталі, можна прийняти, що $v_s = v_D$.

Аналітичне дослідження похибки Δ_{II} пов'язане з певними труднощами. Крім цього, ця похибка практично не залежить від вибраного алгоритму управління процесом шліфування. Тому в теоретичних дослідженнях точності оброблення похибка Δ_{II} приймається однаковою для всіх процесів.

Для зовнішнього шліфування тонкостінних кілець в похибку Δ_Σ входить ще одна складова Δ_F , зумовлена силовими деформаціями деталі.

Числове значення Δ_F з незначними відхиленнями визначається рівнянням:

$$\Delta_F(t) = F_y(t) \frac{R_{ск}^3}{4EJ} \left(\frac{4}{\pi} - \phi \sin \phi - \cos \phi \right) \quad (3)$$

де $F_y(t)$ – моментне значення радіальної сили різання;

$R_{ск}$ – середній радіус кільця;

ϕ – кут, утворений лінією вимірювання й лінією дії радіальної сили різання.

Математична модель процесу виникнення похибок оброблення в технологічних системах. Виходячи з теоретичних основ автоматичного управління процес різання шліфуванням можна розглядати як інерційну ланку [4]. Тут припускається, що інерційність пружної системи шліфувального верстату на декілька порядків менша, ніж інерційність процесу шліфування, коефіцієнт різальних властивостей шліфувального круга K_p в межах кожного етапу циклу оброблення залишається незмінним і ширина шліфування є також постійною величиною [3]. У цьому випадку закон зміни швидкості зняття припуску описується наступним диференціальним рівнянням:

$$T_p \frac{dv_s}{dt} + v_s = K v_\delta, \quad (4)$$

де v_δ – швидкість переміщення шліфувальної бабки (для внутрішнього шліфування – її подвоєне значення);

K – коефіцієнт підсилення, що залежить від відношення швидкостей v_s / v_δ у стаціонарному режимі шліфування, тобто для $t > 3T_p$.

Для процесу врізного шліфування кілець підшипників лінійним зношуванням круга можна знехтувати і, відповідно, прийняти $K = 1$.

Розв'язуючи рівняння (4) з початковими умовами $t = 0$ і $v_s = v_{sn}$, отримаємо:

$$v_s = v_\delta \left(1 - e^{-\frac{t}{T_p}} \right) + v_{sn} e^{-\frac{t}{T_p}}. \quad (5)$$

Інтегруючи рівняння (5) для початкових умов $t = 0$ і $S = S_n$, знаходимо вираз для поточного припуску, що знімається в процесі шліфування:

$$S = S_n - v_{\delta} t + T_p (v_{\delta} - v_{sn}) \left(1 - e^{-\frac{t}{T_p}} \right). \quad (6)$$

Отримані рівняння дозволяють проаналізувати характер зміни $S(t)$ і $v_s(t)$ на кожному з етапів шліфування [5]. На етапах врізання й виходжування рівняння, що описують закономірності зняття припуску та швидкості його зняття, можуть бути отримані із рівнянь (4) і (5) підстановкою у них відповідно $v_{sn} = 0$ і $v_{\delta} = 0$.

Залежність $v_s = f(S)$ визначається аналітично лише на етапі виходжування:

$$v_s = v_{sn} - \frac{S_n - S}{T_p}. \quad (7)$$

Для решти етапів шліфування, для яких $v_{\delta} \neq 0$ і залежність $v_s = f(S)$ визначається трансцендентним рівнянням типу (5), можна знайти наближене аналітичне рішення рівнянь, які зв'язують v_s і S .

Для цього в приведених вище рівняннях замінюється експоненціальний член $e^{-\frac{t}{T}}$ апроксимуючою функцією виду $\phi(t) = -at + b$. Наближення виконується методом найменших квадратів. Найбільш вживаним є таке наближення $\phi(t)$, для якого найменше значення має вигляд:

$$M = \int_{t_1}^{t_2} [f(t) - \phi(t)]^2 dt. \quad (8)$$

Для знаходження параметрів a і b похідні від M за кожним із параметрів прирівнюються до нуля:

$$\frac{1}{2} \frac{\partial M}{\partial a} = \int_{t_1}^{t_2} \left[-at^2 + bt - te^{-\frac{t}{T}} \right] dt = 0; \quad (9)$$

$$\frac{1}{2} \frac{\partial M}{\partial b} = \int_{t_1}^{t_2} \left(-at + b - e^{-\frac{t}{T}} \right) dt = 0. \quad (10)$$

Рівняння апроксимуючої функції у загальному вигляді записується як $\phi(t) = -a_1 \frac{t}{T} + (1-b)$. Числові значення параметрів a_1 і b визначаються заданими границями інтервалу апроксимації t_1 і t_2 , які встановлюються виходячи з найбільшого й найменшого часу оброблення на досліджуваному етапі шліфування. Зрозуміло, що чим вужчий інтервал апроксимації, тим точніше отримане рівняння описує реальну залежність.

У результаті проведеної апроксимації рівняння зміни v_s у функції припуску, наприклад, на етапі врізання має вигляд:

$$v_s = \frac{1}{1-a_1} \left(a_1 \frac{S_n - S}{T_p} + b v_{\delta} \right). \quad (11)$$

Наведені рівняння справедливі для незначної похибки форми деталі та задовільно описують закони зміни $v_s(t)$ і $S(t)$ на чистових етапах шліфування. Але на початкових етапах шліфування характер зміни швидкості значною мірою залежить від величини й характеру вихідних похибок форми оброблюваної поверхні [4].

Дослідження перехідного процесу різання для внутрішнього безцентрового шліфування деталей показало, що на початковому етапі шліфування процес різання суттєво відрізняється від описаного рівнянням (4). Як приклад, на рис. 1,а показано діаграму запису потужності, що витрачається на шліфування під час оброблення отвору внутрішнього кільця підшипника 7208 зі значними похибками форми, а на рис. 1,б – для попередньо прошліфованого кільця.

Відносну величину похибки форми отвору та похибки його розташування відносно поверхні базування легко оцінити за амплітудою коливань потужності та характеру її зміни в часі. Максимальному значенню потужності на певний момент часу відповідає шліфування виступа на поверхні, а мініимальному значенню – шліфування впадини. Чим більше поточне

значення похибки форми, тим більша амплітуда коливань потужності. Ширина шліфування та приведена жорсткість технологічної системи у цьому випадку – величини змінні, що змінюються у функції часу й кута повороту деталі, і аналітичне визначення залежностей $v_s(t)$ і $S(t)$ є досить складною задачею.

Разом із тим, під час оброблення деталей, похибка форми яких визначається в основному непостійністю діаметра отвору в поперечному перерізі, криві процесу шліфування виступів та впадин на поверхні деталі досить задовільно співпадають між собою і відповідають інерційній ланці (рис.1,в). У цьому випадку аналітичне визначення $v_s(t)$ не викликає ускладнень.

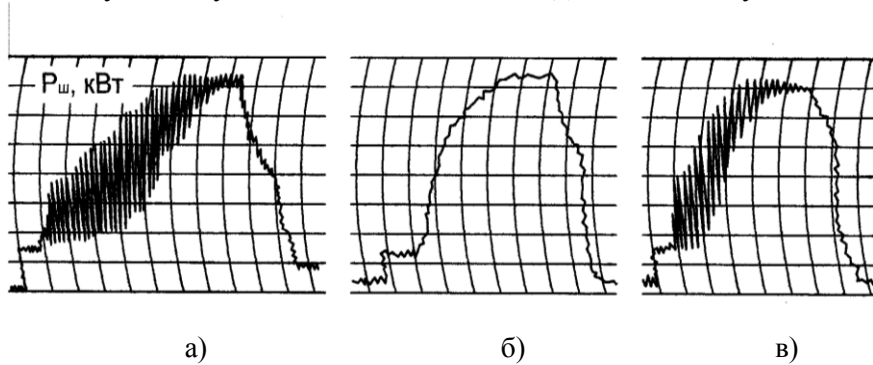


Рис.1. Вплив похибки форми заготовки на характер процесу різання

У початковий період шліфування зняття припуску відбувається лише з виступів оброблюваної поверхні [4]. Час, за який шліфувальний круг буде постійно знаходитись у контакті з деталлю, тобто момент доторкування до дна впадин, визначається як:

$$t_{\text{дом}} = \Delta_{\text{фб}} / v_{\text{б}}, \quad (12)$$

де $\Delta_{\text{фб}}$ – вихідна похибка форми оброблюваної поверхні, яка визначається, наприклад, для безцентрового шліфування як найбільша різностінність деталі.

Для шліфування з пришвидшеним врізанням за подачі v_{np} час $t_{\text{дом}}$ визначається з рівняння (11), якщо $t_{\text{дом}} < t_{\text{np}}$,

де $t_{\text{np}} = T_p \ln \frac{v_{\text{np}}}{v_{\text{np}} - v_s}$ – час пришвидшеного врізання;

v_s – швидкість зняття припуску за включеної чорнової подачі $v_{\text{б}}$.

Для $t_{\text{дом}} > t_{\text{np}}$ час $t_{\text{дом}}$ визначається за формулою:

$$t_{\text{дом}} = \frac{\Delta_{\text{фб}}}{v_{\text{б}}} + \left(1 - \frac{v_{\text{np}}}{v_{\text{б}}}\right) \left[t_{\text{np}} - T_p \left(1 - e^{-\frac{t_{\text{np}}}{T_p}}\right) \right]. \quad (13)$$

Похибка форми деталі в момент часу $t_{\text{дом}}$, чисельно дорівнює пружним деформаціям $S_{\text{но}}$ технологічної системи на цей момент:

$$\Delta'_{\text{фб}} = v_{\text{б}} T_p \left(1 - e^{-\frac{t_{\text{дом}} - t_{\text{np}}}{T_p}}\right) + v_{\text{np}} T_p \left(1 - e^{-\frac{t_{\text{np}}}{T_p}}\right) e^{-\frac{t_{\text{дом}} - t_{\text{np}}}{T_p}}, \quad (14)$$

а припуск, знятий з виступів деталі за час $t_{\text{дом}}$, дорівнює $\Delta_{\text{фб}} - \Delta'_{\text{фб}}$.

Прийнявши за початок відліку час $t_{\text{дом}}$ поточне значення похибки форми деталі визначається як різниця між поточним значенням пружних деформацій системи під час шліфування виступів та впадин:

$$\Delta_{\text{фб}}(t) = v_{\text{б}} T_p \left(1 - e^{-\frac{t_{\text{дом}} - t_{\text{np}}}{T_p}} e^{-\frac{t}{T_p}}\right) + v_{\text{np}} T_p \left(1 - e^{-\frac{t_{\text{np}}}{T_p}}\right) e^{-\frac{t_{\text{дом}} - t_{\text{np}}}{T_p}} e^{-\frac{t}{T_p}} - v_{\text{б}} T_p \left(1 - e^{-\frac{t}{T_p}}\right). \quad (15)$$

Після перетворень:

$$\Delta_{\text{фб}}(t) = \Delta'_{\text{фб}} e^{-\frac{t}{T_p}}. \quad (16)$$

З рівняння (13) випливає, що похибка $\Delta_{\phi\delta}$, якщо T_p залишається незмінним, є функцією лише часу оброблення.

Якщо $t \geq t_{\text{ом}}$, то поточне значення середньої швидкості зняття припуску

$$v_s(T_p) = v_{\phi} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_p}} \right) - \frac{\Delta_{\phi\delta}}{T_p} e^{-\frac{t}{T_p}}. \quad (17)$$

Аналізуючи отримані розрахункові дані та графіки, можна зробити **висновки**:

- якісні співвідношення між окремими складовими похибки оброблення можуть суттєво змінюватись залежно від змінних умов оброблення, побудови циклу, часу шліфування;

- поточне значення випадкових складових динамічної похибки шліфування Δ_v і температурної похибки Δ_{θ} на вікінчувальних етапах оброблення визначаються головним чином нестабільністю швидкості зняття припуску, постійної часу різання та температурних деформацій деталей в кінці чорного шліфування;

- стабілізація швидкості зняття припуску проходить значно швидше стабілізації температурних деформацій деталі. Тому, у ряді випадків основним фактором, що обмежує зменшення часу заключних етапів шліфування, є температурна похибка Δ_{θ} .

- введення етапу виходжування після чорного шліфування дозволяє призначити мінімальний припуск на чистове шліфування за рахунок видалення під час виходжування більшої частини шару з припалами та суттєвого зменшення похибок форми оброблюваного отвору. За незначних коливань швидкості зняття припуску в кінці чорного шліфування Δv_{sn} й постійної часу ΔT_p введення чорного виходжування збільшує продуктивність оброблення. За порівняно великих значень Δv_{sn} , ΔT_p і припуску на виходжування $\Delta D_{\text{в чорн}}$ суттєво збільшується нестабільність швидкості зняття припуску й інших деформацій системи ВПД в кінці етапу шліфування. Збільшується також розсіювання часу виходжування, часу підведення круга до деталі після його правки;

- введення етапу виходжування після чистового шліфування за інших рівних умов дозволяє збільшити чистову подачу і, відповідно, зменшити час підводу круга до деталі;

- найпродуктивнішим є цикл з виходжуванням після чорного й чистового шліфування (четвертий варіант);

- за порівняно тривалого часу зняття чистового припуску $t_{\text{чист}}$, величина температурних деформацій деталі в кінці оброблення залежить, головним чином, від величини чистової подачі. Тому лімітуючим фактором збільшення чистової подачі, поряд із вказаними вище факторами, може стати допустиме значення температурної похибки оброблення, головним чином, її систематичної складової. За порівняно невеликих значень $t_{\text{нідв}}$, $t_{\text{чист}}$ та часу правки, температурні деформації деталей в кінці оброблення будуть залежати також від їх температурних деформацій перед виходом круга на правку.

Інформаційні джерела:

1. Воронцов Л.Н., Корндорф С.Ф. Приборы автоматического контроля размеров в машиностроении: Учебн. пособие для вузов по специальности «Приборы точной механики». – М.: Машиностроение, 1988. – 280 с.: ил.

2. Бежанов Б.Н., Бушинов В.Т. Производственные машины-автоматы. Теория и расчет. – Л.: Машиностроение, 1973. – 359 с.

3. Точность производства в машиностроении и приборостроении. / Под ред. А.Н.Гаврилова. – М.: Машиностроение, 1973. – 567 с.

4. Марчук В.І., Михалевич В.Т. Корекція деформаційних похибок при управлінні точністю механічної обробки // Наукові нотатки: міжвузівський збірник (за напрямом "Інженерна механіка") – Луцьк: Луцький державний технічний університет, - 2000. Випуск 7. – с.143с – 145.

5. Режимы шлифования колец подшипников из сталей ШХ15 и ШХ15СГ. Руководящий документ. НПО ВНИПП. 1988. – 59 с.

Стаття надійшла до редакції 10.11.2017