

УДК 621.9

С.К. Дем'яненко, ст. викл.
Ізмаїльський державний педагогічний інститут

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ОБРОБКИ ТОЧНИХ МІКРОПРОФІЛЬНИХ ПОВЕРХОНЬ ІЗ ВРАХУВАННЯМ ПРУЖНО-ДИСИПАТИВНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДИНАМІЧНОЇ СИСТЕМИ ВЕРСТАТА

(Представлено д.т.н., проф. В.Б.Струтинським)

Запропонована конструкція та динамічна модель у вигляді одномасової динамічної системи з нелінійними характеристиками для реалізації чистової токарної обробки внутрішньої поверхні гідростатичного підшипника.

Гідростатичні підшипники знайшли широке застосування в прецизійних верстатах, зокрема, верстатах шліфувальної групи. Вони забезпечують високу точність положення осі обертання шпинделя, мають значну статичну та динамічну жорсткість.

Точність гідростатичного підшипника визначається точністю обробки основної пари типу "вал-втулка". Регламентований допуск циліндричності отвору втулки складає 8...12 мкм, а допуск вала є ще більш жорстким – 1...2 мкм. Виготовлення гідростатичних підшипників потребує спеціальної технології та устаткування. Завершальною технологічною операцією обробки робочих поверхонь підшипників є шліфувальна операція. Показники якості на шліфувальній операції визначаються численними факторами. Зокрема, на якість обробки впливає чистова токарна операція та попередні технологічні операції.

Втулка гідростатичного підшипника має ряд карманів, розташованих в тангенціальному напрямку на внутрішній поверхні підшипника (рис. 1).

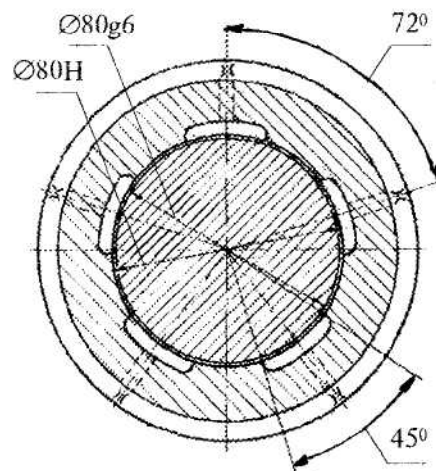


Рис. 1. Переріз типового гідростатичного підшипника шліфувального верстата

При обробці внутрішньої поверхні втулки додаткові похибки виникають з причини динамічних навантажень на контурі кармана. Контур представляє собою нерівний край заглиблення, форма якого одержана на заготівельній операції (лиття), має значну нерівномірність та низьку якість. Обробка форми контуру, як правило, не проводиться з причини складності організації даної технологічної операції.

З метою підвищення точності обробки, а відповідно, і якості гідростатичного підшипника, запропоновано здійснювати чистову токарну операцію з використанням спеціальної борштанги (рис. 2).

Борштанга виконана у вигляді пружного стрижня 1, який закріплено на державці 2, що встановлена в різдетримачі 3. Пружний стрижень має отвір, в якому закріплено різець 4. За рахунок пружності стрижня різець може зміщуватись в напрямку, показаному стрілкою, причому переміщення різця обмежене упором 5.

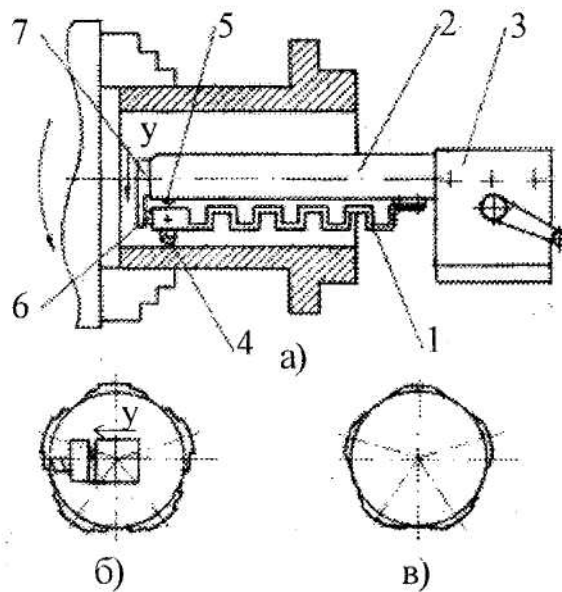


Рис. 2. Реалізація процесу чистової токарної обробки внутрішньої поверхні гідростатичного підшипника за допомогою спеціальної борштанги: а – загальний вигляд борштанги; б – форма поверхні заготовки; в – оброблена поверхня кармана

Борштанга має демпфер, виконаний у вигляді колодки 6, що взаємодіє із торцевою поверхнею пружного стрижня. Коливання стрижня гасяться силами сухого тертя, що виникають між колодкою та торцем стрижня. Колодка встановлена на планці 7, жорстко закріпленій на державці 2. Колодка 6 притискається до пружного стрижня 1 силами пружності, які виникають при поздовжній деформації стрижня.

Обробка внутрішньої поверхні підшипника здійснюється з використанням спеціальної заготовки (див. рис. 2, б). На ділянці заготовки, яка відповідає майбутньому профілю кармана, формується спеціальна заглиблена поверхня, яка має ступінчастий контур. Формування цієї поверхні здійснюється на заготівельній операції. Точність виконання поверхні заготовки складає близько 0,1 мм. Поверхня заготовки в своїй центральній частині утворює карман підшипника. По своїх крайніх частинах поверхня заготовки є основою для чистової токарної обробки профілю кармана.

Токарна чистова операція з використанням спеціальної борштанги враховує особливості динамічних процесів, що мають місце при токарній обробці поверхонь.

Спеціальна борштанга для обробки, наведена на рис. 2, працює наступним чином. Пружний стрижень 1 деформується під дією нестационарних сил різання. Ці сили визначаються товщиною зрізаного шару a , який залежить від форми заготовки.

За рахунок обмеження руху різця упором 5 забезпечується формування точного діаметра внутрішньої поверхні отвору підшипника. Форма карману в тангенціальному напрямку відповідає формі заготовки із врахуванням властивостей пружно-дисипативної системи борштанги (рис. 2, в).

При розробці борштанги виконано аналіз її динамічних властивостей. Динамічна модель борштанги прийнята у вигляді одномасової динамічної системи з нелінійними характеристиками (рис. 3).

Величину статичної складової сили різання P_a , що діє на різець у напрямку осі y , визначали за формулою:

$$P_a = C_p t^{xp} S^{yp} V^{np} K_p.$$

Елементи режиму різання t та S встановили на основі попередніх досліджень при розточуванні конструкційної сталі 18ХГТ, а швидкість різання визначали за формулою

$$V = \frac{C_v}{T^m t^{sv} S^{yv}} \cdot K_v.$$

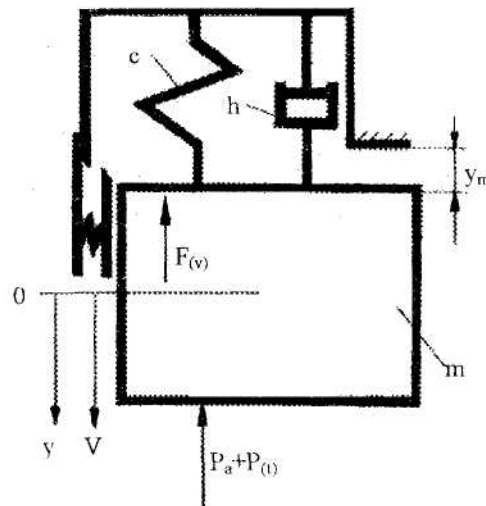


Рис. 3. Динамічна модель борштанги у вигляді одномасової динамічної системи з нелінійними характеристиками: m – еквівалентна маса пружного стрижня та різця, приведена до вершини різця; c – еквівалентна жорсткість пружної системи борштанги; h – лінійна складова коефіцієнта сил опору, що мають місце при коливаннях борштанги; y_m – зазор між пружним стрижнем і упором, що обмежує його рух; $F_{(v)}$ – сила сухого тертя, яка виникає між колодкою та торцем пружного стрижня; $P_a, P_{(t)}$ – статична і динамічна сили різання, що діють на різець у напрямку осі y ; y – переміщення вершини різця відносно статичного положення пружного стрижня; V – швидкість руху вершини різця

Розрахунки показали, що величина складової сили різання P_a змінювалась від 340 Н до 80 Н. Коливання в цих межах складової сили різання P_a періодично деформує пружний елемент борштанги і забезпечує формування поверхні карманів втулки. При цьому $a_0(t) = \frac{P_a}{c}$.

Нелінійне диференціальне рівняння, яке описує коливання вершини різця, одержане у вигляді:

$$m \frac{d^2 y_p}{dt^2} + h \frac{dy_p}{dt} + c y_p = P_p(t) - F \frac{dy_p}{dt}$$

В праву частину рівняння входить проекція сили різання $P(t)$ на вісь y .

Визначимо силу різання у вигляді суми статичної P_a та динамічної $P(t)$ складових:

$$P_p(t) = P_a + P(t)$$

Підставимо значення сили різання в диференціальне рівняння і одержимо:

$$m \frac{d^2 y_p}{dt^2} + h \frac{dy_p}{dt} + c y_p = P_a + P_p(t) - F \frac{dy_p}{dt}$$

В даному диференціальному рівнянні виконаємо заміну вихідного параметра у вигляді переміщення різця y_p шляхом введення відносного переміщення різця у вигляді:

$$y = y_p - a_0(t)$$

Враховуючи, що

$$\frac{dy}{dt} = \frac{dy_p}{dt}, \quad \frac{d^2 y}{dt^2} = \frac{d^2 y_p}{dt^2}$$

одержимо диференціальне рівняння для визначення відносного переміщення різця у вигляді

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + h \frac{dy}{dt} + c y = P(t) - F \left(\frac{dy}{dt} \right)$$

В цьому рівнянні введемо нові коефіцієнти: постійну часу $T = \sqrt{\frac{m}{c}}$, коефіцієнт передачі

$$K_c = \frac{1}{c} \text{ та параметр затухання } \xi = \frac{h}{2cT}$$

При цьому рівняння набуде вигляду:

$$T^2 \frac{d^2 y}{dt^2} + 2\xi T \frac{dy}{dt} + y = K_c P(t) - K_c F\left(\frac{dy}{dt}\right). \quad (1)$$

Динамічна складова сили різання залежить від багатьох факторів, у тому числі факторів випадкового характеру. Згідно з [1], в першому наближенні детермінована складова сили різання описується диференціальним рівнянням:

$$T_p \frac{d^2 P_d(t)}{dt^2} + P_d(t) = K_p a(t), \quad (2)$$

де T_p – постійна часу процесу різання; K_p – коефіцієнт передачі процесу різання; $a(t)$ – відхилення товщини зрізаного шару від деякого (статичного) положення, що визначає статичну силу різання; $P_d(t)$ – детермінована динамічна складова сили різання, яка не враховує випадкові зміни сили різання в часі.

Загальна динамічна складова сили різання визначається у вигляді суми детермінованої $P_d(t)$ та випадкової $P^*(t)$ складових:

$$P(t) = P_d(t) + P^*(t). \quad (3)$$

Диференціальні рівняння (1) і (2) та залежність (3) утворюють нелінійну стохастичну математичну модель, яка описує коливання вершини різця при різанні. Математична модель має вигляд диференціальних рівнянь із суттєвими нелінійностями. Розв'язок диференціальних рівнянь здійснено з використанням системи візуального математичного моделювання SIMULINK математичного пакету MATLAB.

Процедура моделювання включає розробку структурної математичної моделі, до складу якої входять лінійні та нелінійні блоки різного призначення. Для розробки структурної моделі процесу різання виконаємо інтегрування в часі диференціального рівняння (2).

Звідси знайдемо детерміновану динамічну складову сили різання:

$$P_d(t) = \frac{K_p}{T_p} \int_0^t a(t) dt - \frac{1}{T_p} \int_0^t P_d(t) dt. \quad (4)$$

Виконаємо подвійне інтегрування диференціального рівняння (1) і одержимо:

$$T^2 \int_0^t \int_0^t \frac{d^2 y}{dt^2} (dt)^2 + 2\xi T \int_0^t \int_0^t \frac{dy}{dt} dt + \int_0^t \int_0^t y dt = K_c \int_0^t \int_0^t P(t)(dt)^2 - K_c \int_0^t \int_0^t F\left(\frac{dy}{dt}\right) (dt)^2.$$

Звідси визначаємо динамічне переміщення вершини різця під дією складової сили різання:

$$y(t) = \frac{K_c}{T^2} \int_0^t \int_0^t P(t)(dt)^2 - \int_0^t \int_0^t y(t) dt T - \frac{K_c}{T^2} \int_0^t \int_0^t F\left(\frac{dy}{dt}\right) (dt)^2. \quad (5)$$

При виведенні залежностей (4) і (5) враховано нульові початкові умови задачі, а саме, що при $t = 0$ $y(t) = 0$, $\frac{dy}{dt} = 0$, $P_d(t) = 0$.

Використання нульових початкових умов у даному випадку не є суттєвим і мало впливає на результати розрахунків.

Залежності (4), (5) реалізовані у вигляді загальної структурної математичної моделі (S-модем) системи SIMULINK для розрахунку детермінованих динамічних переміщень вершини різця (рис. 4).

Входом структурної моделі є структурна зміна припуску на поверхні заготовки. Даний вхід реалізований чотирма блоками Step, а часова реалізація входу наведена на верхньому графіку рис. 5.

Структурна математична модель викликає нелінійний блок Con Iomb & Visons Fruktion, який реалізує залежність сили сухого тертя від швидкості переміщення різця. Швидкість переміщення різця знайдена в результаті диференціювання переміщення різця в функції часу, яке здійснюється за допомогою блока Derivative (диференціатор).

Виконане математичне моделювання детермінованих динамічних переміщень вершини різця дає можливість визначити результуючу форму обробленої поверхні кармана гідростатичного підшипника. Характерна поверхня кармана наведена на рис. 5 (нижній графік). В цілому одержана форма кармана повторює форму заготовки. Наявне деяке зміщення контуру кармана відносно контуру заготовки. Це зміщення необхідно враховувати при підготовці профілю заготовки під майбутній карман.

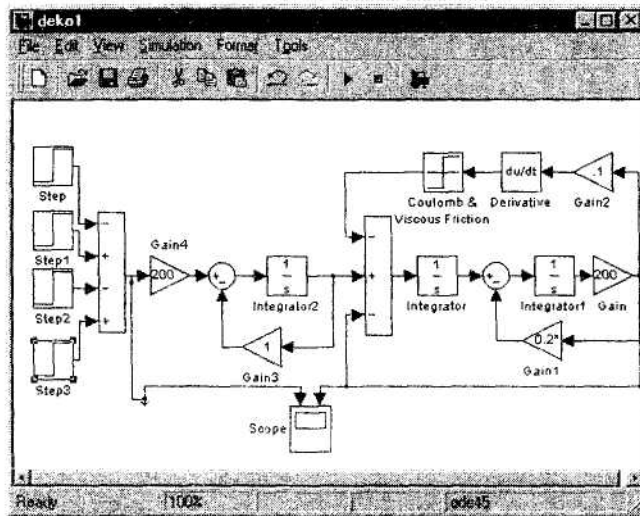


Рис. 4. Структурна математична модель для розрахунку детермінованих динамічних переміщень вершини різця

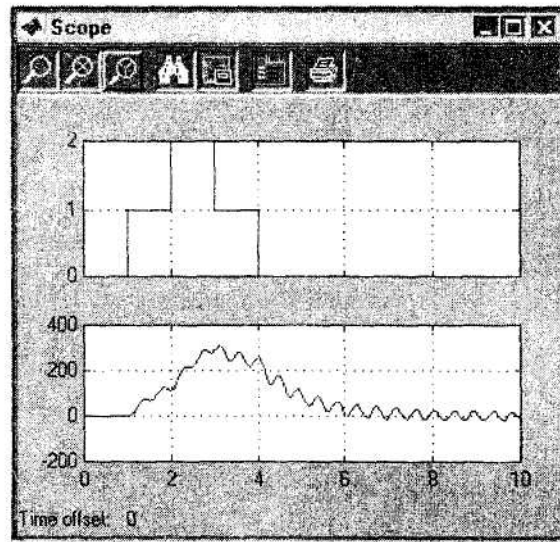


Рис. 5. Результати математичного моделювання детермінованих динамічних переміщень вершини різця (нижній графік) для ступінчастої зміни припуску на поверхні заготовки (верхній графік)

В результаті математичного моделювання встановлено наявність високочастотних коливань різця. Вони викликаються власною нестійкістю процесу сухого тертя, який визначає демпфування динамічної системи борштанги. Ці коливання загалом є небажаним явищем. Для запобігання негативного впливу високочастотних коливань на якість обробки кармана рекомендовано вдосконалити конструкцію борштанги, використавши додаткові дисипативні елементи.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Кудинов В.А. Динамика станков. – М.: Машиностроение, 1967. – 359 с.

ДЕМ'ЯНЕНКО Сергій Касянович – старший викладач Ізмаїльського державного педагогічного інституту.

Наукові інтереси:

– конструювання металорізальних верстатів.