

І.В. Гурей, В.І. Гурей*, П.Р. Дмитерко
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра технології машинобудування,

* Тернопільський національний технічний університет ім. І. Пулюя,
кафедра конструювання верстатів, інструментів та машин

МОДЕЛЮВАННЯ ГІРОСКОПІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ПІД ЧАС ФРИКЦІЙНОГО ЗМІЦНЕННЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

© Гурей І.В., Гурей В.І., Дмитерко П.Р., 2013

Розроблено математичну модель гіроскопічних процесів та прецесійного переміщення осі обертання інструмента, який швидко обертається при фрикційному зміцненні деталей машин.

Mathematical model of gyroscopic processes and precession movement of the axis of high speed rotation tool is designed for frictional hardening machine parts.

Постановка проблеми. Актуальним завданням сучасного машинобудування є забезпечення довговічності деталей, яка великою мірою визначається якісним станом поверхневого шару. Довговічність деталей машин залежить від якості обробки деталей і стану їх поверхневого шару, який спрямовано формується на фінішних операціях технологічного процесу виготовлення. Нині ведеться багато досліджень для визначення оптимальної системи параметрів якості поверхонь деталей машин, яка б повніше відображала їх експлуатаційні властивості [1, 2].

Саме стан поверхні визначає експлуатаційні властивості деталей машин. Це зумовило появу нового напрямку у машинобудуванні – інженерії поверхні, яка полягає у розробленні науково обґрунтованого визначення форми робочих поверхонь, їх геометричних параметрів і фізико-хімічних та механічних властивостей, що забезпечують безвідмовність і економічно доцільну довговічність, а також у створенні відповідних поверхонь, їх контролю, випробування, контролю під час експлуатації [3].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Експлуатаційні властивості деталей машин є функцією параметрів стану поверхневого шару, отриманого під час їх обробки, а також умовами експлуатації. Керування властивостями поверхні та поверхневого шару досягається за рахунок зміни структури поверхневих шарів (аморфізація, створення метастабільних нанокристалічних структур) або його легування, а також формування на поверхні деталі шарів з відмінними від основного матеріалу складом. Сьогодні для поверхневої обробки та зміцнення застосовуються методи з використанням висококонцентрованих джерел. Ці методи характеризуються дією концентрованих потоків енергії високої інтенсивності з великими швидкостями на невеликі об'єми поверхневого шару металу та подальшим їх швидкісним охолодженням. У поверхневих шарах деталей машин, здебільшого, формуються нанокристалічні структури, які мають специфічні фізико-механічні, електрохімічні, корозійні і експлуатаційні характеристики. Фрикційна обробка також належить до цих методів поверхневого зміцнення. У процесі фрикційного зміцнення у поверхневих шарах оброблюваної деталі у зоні контакту інструмент-деталь відбувається високошвидкісне нагрівання металу до температур, вищих від точки фазових перетворень за рахунок високошвидкісного тертя інструменту по оброблюваній поверхні. У поверхневому шарі деталей додатково відбувається ще інтенсивне зсувне деформування металу [4].

Умова контакту між зміцнювальним інструментом і оброблюваною деталлю має вирішальне значення впливу на якість обробки. Мікро- та макронерівності при зміцненні залежать від матеріалу і форми робочої поверхні інструмента, кількості і розмірів пазів, кінематичних відношень руху інструменту і деталі. Особливо недостатньо дослідженні кінематичні і динамічні явища, пов'язані з прецесійним рухом зміцнювального інструмента і гіроскопічним ефектом.

Формулювання цілі статті. Метою роботи було дослідження впливу параметрів процесу фрикційного зміцнення на гіроскопічні ефекти під час фрикційного зміцнення деталей машин.

Виклад основного матеріалу. За кінематикою процес фрикційного зміцнення є аналогічний до процесу шліфування. Для його реалізації використовуються плоско- або круглошліфувальні верстати або токарні верстати з спеціальною фортушкою для забезпечення автономного приводу зміцнювального інструменту. Частота обертання інструмента повинна бути вищою, більше ніж у два рази як під час шліфування. При високій частоті обертання інструмента можуть відбуватись прецесійні переміщення інструменту та гіроскопічні явища за рахунок незбалансованості інструмента. Чистова обробка поверхонь інструмента відбувається на спеціальній оправці для зменшення як радіального, так торцевого биття робочих поверхонь. Інструмент встановлюється на шпиндель верстата, попередньо провівши його статичне і динамічне балансування. Тим не менш досягнути повної зрівноваженості інструменту є складно. При високих частотах обертання ($80\text{--}150\text{ с}^{-1}$) інструменту за рахунок незрівноваженості та неточності його установки на верстаті відбувається прецесійне переміщення осі шпинделя. Площина інструмента-диска не є строго перпендикулярною до осі обертання, а нахилена під невеликим кутом. Центр мас інструмента також не зовсім збігається з віссю обертання. У цьому випадку виникають гіроскопічні моменти і сили, які періодично змінюють тиск на опори шпиндельного вузла верстата.

Розглянемо обертання шпинделя шліфувального верстата під дією статичної і динамічної незрівноваженості [5]. Шпиндель верстата має неоднакову жорсткість опор. Під дією сил, які виникають у зоні контакту інструмент-деталь під час зміцнення шпиндель прогинається, а відповідно відбувається скривлення його осі обертання і торцева площина інструмента також буде нахилена під кутом до осі. Для опису процесів, які відбуваються при високошвидкісному обертанні інструмента, приймаємо, що центр мас шпинделя відстає від геометричної осі обертання на відстань s , головна вісь інерції створює із цією віссю кут δ , вектор $A'O$ і вісь η створює кут ξ , площина, у якій лежить кут δ і площина xu , утворюють кут $(\omega t - \xi)$ (рис. 1).

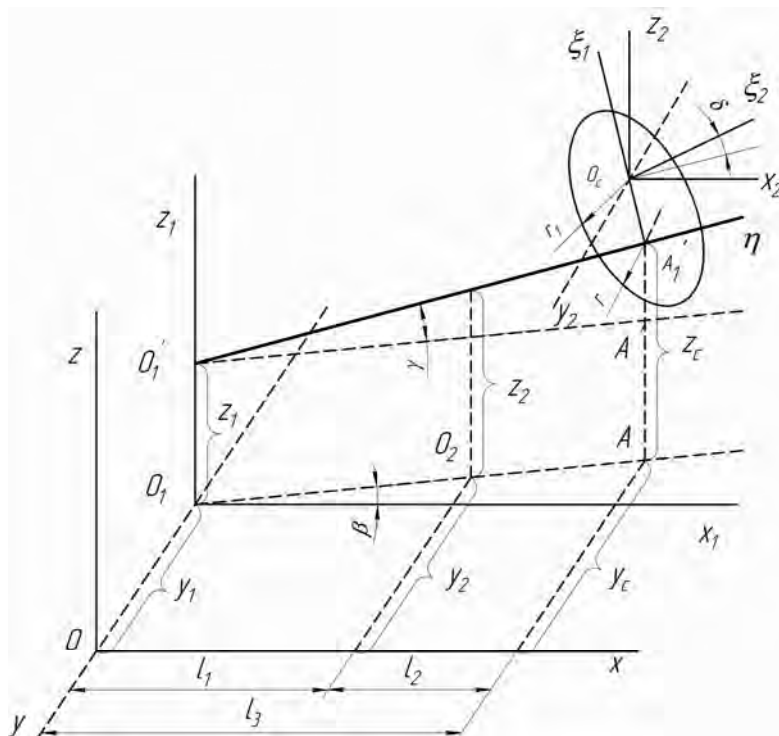


Рис. 1. Положення шпинделя шліфувального верстата

Під час фрикційного зміцнення у зоні контакту за рахунок високошвидкісного тертя інструмента по оброблюваній поверхні деталі виникають сили взаємодії, які можна розкласти на складові по осях x та y (тангенціальна складова P_z і радіальна складова P_y). Силowe навантаження опор шпинделя верстата (O_1 і O_2) наведено на рис. 2.

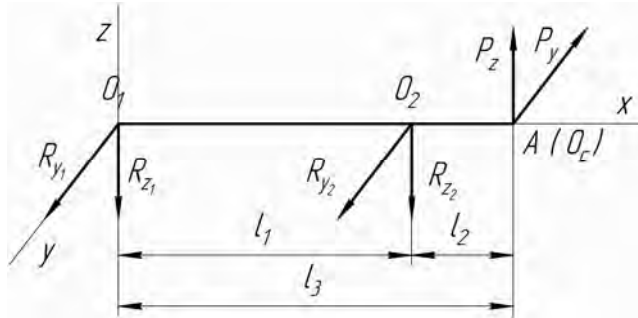


Рис. 2. Схема сил, які діють на шпиндель верстата

У разі виникнення прецесійних переміщень осі шпинделя виникає певна похибка обробленої поверхні. Для визначення похибки необхідно встановити закони руху осі і центра мас інструмента. Використовуючи теорему про момент кількості руху і про рух центра мас системи, запишемо диференціальне рівняння руху шпинделя при статичній і динамічній незрівноваженості в такому вигляді :

$$\begin{cases} My'''' + c_1 y_1 + c_2 y_2 = Me\omega_\xi^2 \cos(\omega_\xi t) \\ Mz'''' + c_1 z_1 + c_2 z_2 = Me\omega_\xi^2 \cos(\omega_\xi t) \\ A\omega_\xi \beta_2' + B\gamma_2'' + c_1 z_1 l_1 + c_2 z_2 l_2 = (A+B)\delta\omega_\xi^2 \sin(\omega_\xi t - \xi) \\ A\omega_\xi \gamma_2' - B\beta_2'' - c_1 y_1 l_1 - c_2 y_2 l_2 = -(A+B)\delta\omega_\xi^2 \cos(\omega_\xi t - \varepsilon) \end{cases} \quad (1)$$

Використовуючи рівняння обертання шпинделя навколо осей y та z , отримаємо систему лінійних неоднорідних диференціальних рівнянь малих коливань шпинделя

$$\begin{cases} M(l_3 y_2'' - l_2 y_1'') + c_1 l_1 y_1 + c_2 l_1 y_2 = Mel_1 \omega_\xi^2 \cos(\omega_\xi t) \\ M(l_3 z_2'' - l_2 z_1'') + c_1 l_1 z_1 + c_2 l_1 z_2 = Mel_1 \omega_\xi^2 \sin(\omega_\xi t) \\ A\omega_\xi (y_2' - y_1') + B(z_2'' - z_1'') + c_1 z_1 l_1 l_3 + c_2 z_2 l_1 l_2 = (A+B)\delta\omega_\xi^2 l_1 \cos(\omega_\xi t - \varepsilon) \\ A\omega_\xi (z_2' - z_1') + B(y_2'' - y_1'') + c_1 y_1 l_1 l_3 + c_2 y_2 l_1 l_2 = -(A+B)\delta\omega_\xi^2 l_1 \cos(\omega_\xi t - \varepsilon) \end{cases} \quad (2)$$

Праві частини рівняння включають збуджуючі фактори, зумовлені статичною і динамічною незрівноваженістю. Розв'язок цих рівнянь складається із загального розв'язку системи без правої частини і часткового розв'язку, який визначає вимушені коливання шпинделя. Частковий розв'язок має вигляд:

$$\begin{cases} y_1 = a_1 \cos(\omega_\xi t) + b_1 \sin(\omega_\xi t) \\ z_1 = a_2 \sin(\omega_\xi t) + b_2 \cos(\omega_\xi t) \\ y_2 = a_3 \cos(\omega_\xi t) + b_3 \sin(\omega_\xi t) \\ z_2 = a_4 \sin(\omega_\xi t) + b_4 \cos(\omega_\xi t) \end{cases} \quad (3)$$

Підставляємо рівняння (3) у рівняння (2) і прирівнюємо суму всіх членів, які мають множники $\cos \omega_\xi t$ і $\sin \omega_\xi t$, отримаємо дві системи алгебраїчних рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} M\omega_\xi^2(l_2a_1 - l_3a_3) + c_1l_1a_1 + c_2l_1a_3 = Mel_1\omega_\xi^3 \\ M\omega_\xi^2(l_2a_2 - l_3a_4) + c_1l_1a_2 + c_2l_1a_4 = Mel_1\omega_\xi^3 \\ -A\omega_\xi^2(a_3 - a_1) - B\omega_\xi^2(a_4 - a_2) + c_1l_1l_3a_2 + c_2l_1l_2a_4 = (A+B)\delta\omega_\xi^2l_1\cos(\varepsilon) \\ A\omega_\xi^2(a_4 - a_2) + B\omega_\xi^2(a_3 - a_1) - c_1l_1l_3a_1 + c_2l_1l_2a_3 = -(A+B)\delta\omega_\xi^2l_1\cos(\varepsilon) \end{array} \right. \quad (4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} M\omega_\xi^2(l_2b_1 - l_3b_3) + c_1l_1b_1 + c_2l_1b_3 = 0 \\ M\omega_\xi^2(l_2b_2 - l_3b_4) + c_1l_1b_2 + c_2l_1b_4 = 0 \\ A\omega_\xi^2(b_3 - b_1) - B\omega_\xi^2(b_4 - b_2) + c_1l_1l_3b_2 + c_2l_1l_2b_4 = -(A+B)\delta\omega_\xi^2l_1\sin(\varepsilon) \\ A\omega_\xi^2(b_4 - b_2) + B\omega_\xi^2(b_3 - b_1) - c_1l_1l_3b_1 + c_2l_1l_2b_3 = (A+B)\delta\omega_\xi^2l_1\sin(\varepsilon) \end{array} \right. \quad (5)$$

З рівнянь (4) і (5) за умови:

$$f_1(\omega) = [(A+B)\omega_\xi^2 + c_2l_1l_2](M\omega_\xi^2l_2 + c_1l_1) + [(B-A)\omega_\xi^2 + c_1l_1l_3](M\omega_\xi^2l_3 + c_2l_1) \neq 0$$

та рівностей : $a_1 = a_2$; $a_3 = a_4$; $b_1 = -b_2$; $b_3 = -b_4$ знаходимо постійні :

$$a_1 = \frac{1}{f_2(\omega)} \left\{ -Mel_1\omega_\xi^2[(A+B)\omega_\xi^2c_2l_1l_2] + (M\omega_\xi^2l_3 - c_2l_2)(A+B)\delta\omega_\xi^2l_1\cos(\varepsilon) \right\} \quad (6)$$

$$a_3 = \frac{1}{f_2(\omega)} \left\{ -Mel_1\omega_\xi^2[(A+B)\omega_\xi^2 - c_2l_1l_2] + (M\omega_\xi^2l_3 - c_2l_2)(A+B)\delta\omega_\xi^2l_1\cos(\varepsilon) \right\} \quad (7)$$

$$b_1 = \frac{1}{f_2(\omega)} (M\omega_\xi^2l_3 - c_1l_1)(A+B)\delta\omega_\xi^2l_1\sin(\varepsilon) \quad (8)$$

$$b_3 = \frac{1}{f_2(\omega)} (M\omega_\xi^2l_2 - c_1l_1)(A+B)\delta\omega_\xi^2l_1\sin(\varepsilon) \quad (9)$$

де

$$f_2(\omega) = -[(A+B)\omega_\xi^2 - c_2l_1l_2](M\omega_\xi^2l_2 + c_1l_1) + [(B+A)\omega_\xi^2 + c_1l_1l_3](M\omega_\xi^2l_3 - c_2l_1) \neq 0$$

Підставляючи значення y_1, y_2, z_1, z_2, u рівняння (1) і (2), знаходимо:

$$\beta = \frac{1}{f_2(\omega)} \left\{ -Mel_1\omega_\xi^2(c_1l_1 - c_2l_2)\cos(\omega_\xi t) + [M\omega_\xi^2(l_2 - l_1) + c_1l_1 + c_2l_2](A+B)\delta\omega_\xi^2\cos(\varepsilon) + \right.$$

$$\left. + \cos(\omega_\xi t) + [M\omega_\xi^2(l_2 - l_1) + c_1l_1 + c_2l_2](A+B)\delta\omega_\xi^2\sin(\varepsilon) + \sin(\omega_\xi t) \right\} - \delta\cos(\omega_\xi t - \varepsilon)$$

$$\gamma = \frac{1}{f_2(\omega)} \left\{ -Mel_1\omega_\xi^2(c_1l_1 - c_2l_2)\sin(\omega_\xi t) + [M\omega_\xi^2 + (l_2 - l_1) + c_1l_1 + c_2l_2](A+B)\delta\omega_\xi^2\cos(\varepsilon) + \right.$$

$$\left. + \sin(\omega_\xi t) - [M\omega_\xi^2(l_2 - l_1) + c_1l_1 + c_2l_2](A+B)\delta\omega_\xi^2\sin(\varepsilon) + \cos(\omega_\xi t) \right\} + \delta\sin(\omega_\xi t - \varepsilon)$$

де

$$A = \frac{1}{2}M_1 \cdot R^2 + \frac{1}{2}M_2 \cdot R_1^2$$

$$B = M_1 \left(\frac{R}{4} + \frac{l_8^2}{3} \right) + M_2 \left(\frac{R_1^2}{4} + \frac{(l_8 + l_9)^3 - l_8^3}{3 \cdot l_2} \right)$$

Вимушені коливання шпинделя, спричинені статичною і динамічною незрівноваженістю, представляють пряму прецесію з кутовою швидкістю ω_x , яка дорівнює швидкості шпинделя ω_ξ .

На основі отриманих рівнянь будуємо криві, які описують переміщення осі шпинделя під час фрикційного зміцнення деталей машин (рис. 3).

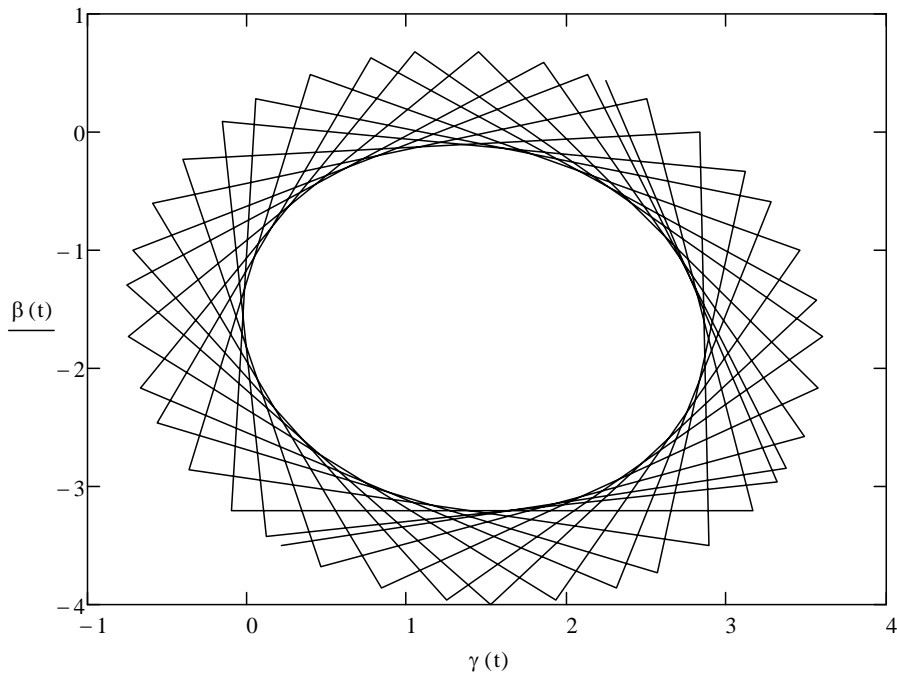


Рис. 3. Положення осі шпинделя верстата під час фрикційного змицнення деталей машин

Висновки. На підставі проведеного моделювання отримано математичні залежності поведінки осі шпинделя під час фрикційного змицнення деталей машин, які дозволяють визначити прецесійне переміщення залежно від незрівноваженості інструмента.

1. *Инженерия поверхности деталей / под ред. А.Г. Сулова. – М. : Машиностроение, 2008. – 320 с.* 2. *Сулов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с.* 3. *Корж В.М. Инженерия поверхности – новый технологичный напрямок виготовлення деталей машин і конструкцій / В.М. Корж, Ю.С. Попіль // Сучасне машинобудування. – 1999. – № 1. – С. 92–94.* 4. *Гурей І.В., Гурей Т.А. Підвищення довговічності напрямних технологічного обладнання фрикційним змицнення // Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка»: «Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні і приладобудуванні». – 2011. – Вип. 702. – С. 19–24.* 5. *Колев К.С., Горчаков Л.М. Точность обработки и режимы резания. – М.: Машиностроение, 1976. – 144 с.*