УДК621.87

М. Підгурський М. Левкович, О. Лясота
Тернопільський національний технічний університет

ДОСЛІДЖЕНЬ ФОРМОУТВОРЕННЯ СФЕРИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ НА ВЕРСТАТАХ ТОКАРНОЇ ГРУПИ

В роботі досліджено вплив геометричних параметрів вузлів та деталей запропонованого пристрою - інструменту, точність їх взаємного розташування, а також точність розміщення осей напрямних оснащення на процес формоутворення сферичних поверхонь.

Вступ. Ремонт та модернізація технологічного та транспортного обладнання нерідко супроводжується виготовленням високоточних сферичних поверхонь, що утворюють кінематичні пари із трьома ступенями вільності. Технологія обробки деталей машин, які містять фасонні (зокрема сферичні) поверхні завжди вимагає використання спеціального інструменту і устаткування, яке робить складні рухи формоутворення. Створювання спеціального технологічного обладнання, оснащення та інструменту за умов одиничного виробництва з частою змінюваністю виготовлюваних виробів не є економічно вигідним. Тому тут важливі універсальні методи одержання сферичних поверхонь, на наявному обладнанні способами в основі яких лежать кінематичні можливості верстатів.

Постановка проблеми. Виходячи з необхідності рішення вказаних вище задач в науково-дослідній лабораторії “Синтез технологічних інновацій в машинобудуванні” Тернопільського національного технічного університету ім. Івана Пулюя були проведені дослідницькі роботи, направлені на створення і дослідження нових технологічний процесів, що забезпечують підвищення якості і зниження трудомісткості обробки сферичних поверхонь які є елементами великої кількості деталей машин. З цією метою розроблений і впроваджений у практичну реалізацію кінематичний метод точіння сферичних поверхонь із радіусами кривизни від 25 до 300 мм, заснований на співвідношенні відносних рухів заготовки та інструмента.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Незважаючи на значну кількість наукових праць, які присвячені різноманітним методам обробки криволінійних поверхонь в деталях машин, проте мало уваги приділено обробленню сферичних поверхонь. В працях [1,2] запропоновано обробку сферичними фрезами на верстатах з ЧПК. В роботах [4,5] запропоновано пристрої для оброблення сфер на токарних верстатах з використанням складного спорядження. В загальному рівень технологічного забезпечення виготовлення сферичних поверхонь залишається недостатньо високим. Тому вирішення наукового завдання, яке полягає в розробці і дослідженні нових конструкцій пристроїв для оброблення сферичних поверхонь та технологій їх виготовлення є актуальним, доцільним, значущим і перспективним для машинобудівної галузі України та інших держав.

Рисунок 1 – Фото процесу оброблення

Мета роботи. Дослідження процесу оброблення сферичних поверхонь кінематичним методом заснованим на співвідношенні відносних рухів заготовки й інструмента.

Методи та результати. Для досягнення мети в науково-дослідній лабораторії “Синтез технологічних інновацій в машинобудуванні” ТНТУ ім. Івана Пулюя розроблено і впроваджено у практичну реалізацію спеціальний пристрій (пат. України №14336) і досліджено технологію оброблення сферичних поверхонь із радіусами кривизни від 25 до 300 мм. Процес оброблення (рис. 1) здійснюється комплексом переміщень заготовки й інструмента, що складається із трьох основних рухів. Перший з них - рух різання (*I)* (обертальний) - створюється щодо осі розробленого пристрою 4, у якому закріплений інструмент. Утворена при цьому ріжучими крайками різця поверхня є виробляючою (або інструментальною). Другий рух - огинання (*II)* (або обкатування) – інструмент рухається щодо осі заготовки. Здійснюється цей рух шляхом коливного руху різця. Оброблювана поверхня виходить як огинання великої кількості слідів інструментальної поверхні. Цей рух є основним, визначальним кінематичного методу. Третій рух – подачі (*III)* - полягає в поступовому врізанні інструмента в заготовку, здійснюється цей рух переміщенням пінолі. Для обробки сфер можна використовувати універсальні металообробні верстати токарної групи.

Розглянемо точіння ввігнутої сферичної поверхні на токарному верстаті 16К20 (рис. 1), заготовка 3 встановлена в патрон 1. Розточувальний пристрій 4 встановлений в пінолі 5, а важіль для здійснення коливного руху різця закріплений в різцетримачі 2 верстата.

На рис. 2 представлена схема одержання ввігнутої сферичної поверхні в заготовці 3 (підп'ятнику) за допомогою різця, з використанням різцевої головки 4.

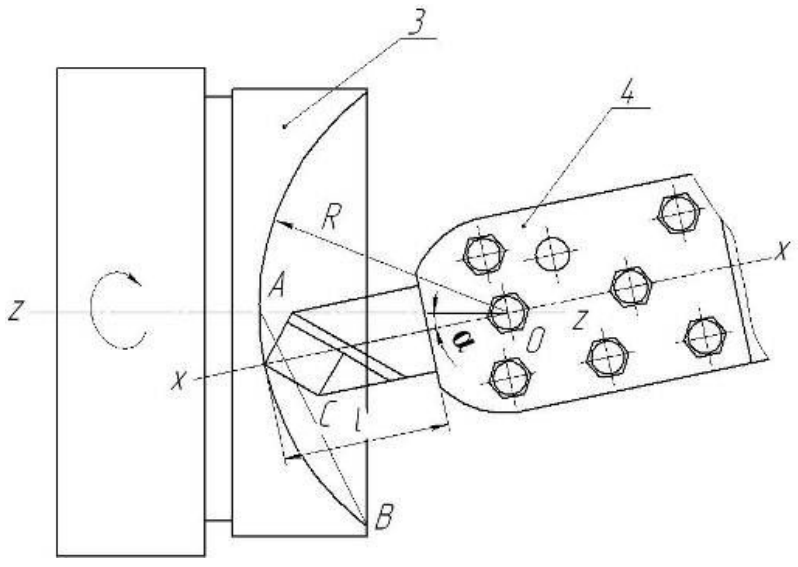

Рисунок 2 – Схема обробки сфери

Для одержання такої поверхні необхідно, щоб геометричні осі *x-x* пристрою 4 (рис.2) і *z-z* заготовки 3 перетиналися під кутом α, величину якого визначають за формулою

$$\alpha = \boldsymbol{arcsin}\frac{l}{R},$$

де R - радіус необхідної сферичної поверхні, мм; l - виліт різця (лінійний розмір інструмента, мм).

Після установки пристрою з інструментом в пінолі та різцетримачі а заготовки в трьохкулачковому патроні здійснюють їхнє взаємне центрування. Шляхом надання інструменту послідовно рухів *I, II* і *III* одержують потрібну сферичну поверхню.

При обробці за схемою, наведеною на рис. 2, радіус сфери R обирають за кресленням деталі. Виліт інструменту визначають в масштабі шляхом виміру на кресленні хорди *AB,* розмір якої буде (орієнтовно) номінальним виліту інструменту. Потім з нормального ряду вибирають довжину інструменту з певним стандартним розміром. Кут α повороту різцевої головки визначають за наведеною формулою, підставляючи значення l виліту різця.

Обробку доцільно вести інструментом мінімальної довжини, залишаючи припуск для кінцевого чистового проходу, що виконується в результаті одного з можливих рухів верстату, спрямованих уздовж осі деталі. Заданий розмір R сфери одержують поетапно шляхом врізання інструменту 4 (рис. 3) у заготовку 3, послідовних вимірів отриманих радіусів кривизни й виконання ряду можливих додаткових (коригувальних) рухів органів верстату та інструменту.

Такими рухами є:

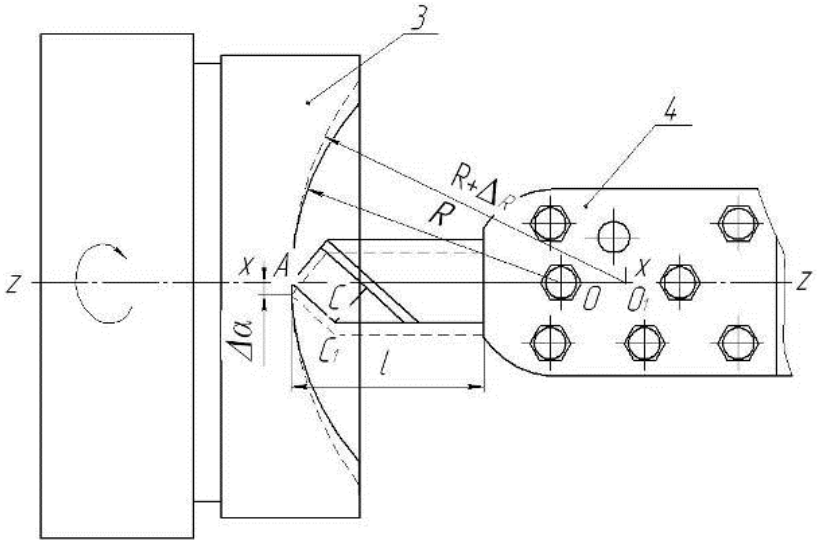

Рисунок 3 – Схема обробки сфери

- поворот пристрою (рис. 4) на кут, визначений з рівності

$\Delta\alpha = (\alpha + \Delta\alpha) - \alpha = \boldsymbol{arcsin}\frac{l}{R+\Delta R} - \boldsymbol{arcsin}\frac{l}{R}$, де ΔR - величина виправлення на радіус сфери, тобто різниця між отриманим $R_П$ і необхідним значеннями радіусу сфери $\Delta R = R_П - R$, мм;

- зміна радіального розміру інструмента Δl (рис. 3), розрахованого за формулою $\Delta l \approx \Delta R\,\boldsymbol{sin}\,\alpha$;

- переміщення різця в осьовому напрямку *ΔS;*

- поздовжній зсув пристрою на верстаті (рис. 3*)* на величину $\Delta a \approx \Delta R tg\alpha$;

- поздовжнє висування різцетримача (рис. 4) на величину $\Delta S \approx \frac{\Delta R}{\cos\alpha}$

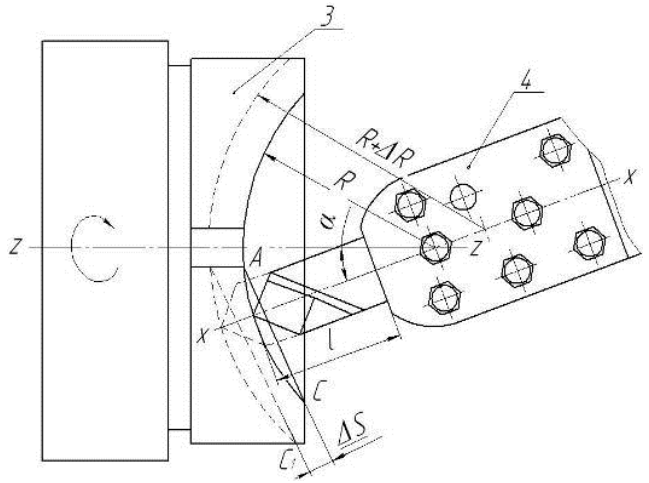

Рисунок 4 – Схема обробки сфери

Доцільність застосування того чи іншого прийому із чотирьох можливих залежить від величини ΔR, кінематичних можливостей верстату, наявності інструмента необхідних розмірів. Для безпосереднього виміру розмірів і контролю форми сферичних поверхонь використовують індикаторні та кільцеві сферометри ИЗС-7, ИЗС-8; прості й переналагоджувальні шаблони та інші контрольно-вимірювальні інструменти.

Точність центрування осі виробу визначають за формою та конфігурацією сітки на попередньо обробленій сферичній поверхні. Якщо лінії сітки симетричні та сходяться опуклостями в центрі сфери, то центрування виконано правильно. В іншому випадку лінії сітки будуть асиметричні та центр їхнього торкання зміщений. За величиною цього зсуву визначають значення необхідних поздовжніх і поперечних переміщень інструменту або пристрою. Переміщення інструменту (пристрою) вздовж осі не змінює кривизни сферичної поверхні. Воно забезпечує задану глибину врізання. Якщо траєкторія руху ріжучих елементів різцевої головки виходить за межі заготовки (рис. 4), то величину Δl можна знайти безпосереднім виміром відрізка AC_1.

Для підтвердження теоретичних передумов та обґрунтування конструктивно-технологічних рішень проводились експериментальні дослідження.

Згідно [7] у випадку математичного методу планування експерименту перед початком дослідів проводили глибокий аналіз явища та вибір умов проведення дослідів для розв’язання поставлених задач з необхідною точністю. Завдяки використанню математичного апарату формалізовано експериментальні дії, дослідження проводять з одночасним варіюванням декількох факторів, рівні факторів приймали за спеціальними розрахунками, число дослідів зводилось до мінімуму, а після кожної серії дослідів приймались обґрунтовані рішення.

Для отримання регресійних моделей параметрів оптимізації у вигляді повного квадратичного полінома, вибрали відповідний план експерименту. В даний час існує ряд різновидів таких планів, які відрізняються критеріями оптимізації регресійного аналізу результатів експерименту [8]. Широке

практичне застосування знайшли симетричні плани з декількома змінними. Найбільш простими у практичному застосуванні є ортогональні (ОЦКП) та рототабельні (РЦКП) центрально-композиційні плани. Різниця між ними полягає в тому, що перший план будується з урахуванням критерію ортогональності, який забезпечує незалежність визначення коефіцієнтів регресії, а інший - критерію рототабельності, який забезпечує однаковість дисперсії відгуку в усіх напрямках.

- З врахуванням спрощення обробки результатів лабораторних експериментів прийняли ОЦКП ПФЕ типу 2^3, тобто трифакторний експеримент на двох рівнях варіювання, реалізацію якого здійснювали в такій послідовності:
- кодування факторів;
- складання плану – матриці експерименту;
- рандомізація дослідів;
- реалізація плану експерименту;
- перевірка відтворюваності дослідів;
- перевірка адекватності моделі;
- оцінка значущості коефіцієнтів регресії.

Для оброблення сферичної поверхні на токарному верстаті твердосплавними різцями основні змінні фактори, які впливали на процес різання:

- швидкість різання $V = 80 - 120$ м/хв;
- глибина різання $t = 0,4 - 2$ мм;
- подача $S = 0,5 - 1,1$ мм/об.

Оскільки при проведенні експериментів змінні незалежні фактори – величина швидкості різання *V,* глибина різання *t* і швидкість подачі *S* розточувального різця, неоднорідні і мають різні одиниці вимірювання, а числа, що виражають значення цих факторів – різні порядки, тому привели їх до єдиної системи обрахунків шляхом переходу від дійсних значень до кодованих. Зв'язок між кодованими та натуральними значеннями факторів встановили згідно формули [7]:

$$x_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\Delta X_i},$$

де x_i та X_i – відповідно кодоване та натуральне значення факторів;

X_{i0} – натуральне значення і-го фактора на нульовому рівні;

ΔX_i – інтервал варіювання і–го фактора.

Дослідження проводили за одночасним варіюванням усіх факторів, які впливають на точність процесу дослідження за планом повного факторного експерименту. Змінні параметри:

y – логарифм величини сили (*lnPz)*, Н;

x_1 – логарифм величини, швидкості подачі проточувального різця (*lnS*), мм/хв;

x_2 – логарифм величини швидкості різання (*lnV)*, м/хв;

x_3 – логарифм глибини різання (*lnt*),мм.

Неповне квадратне рівняння для трифакторного експерименту визначали за залежністю:

$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3$ де x_i – кодовані фактори, *i = 1, 2,3*; b_i,

b_{ij} – коефіцієнти при відповідних значеннях *x*.

Коефіцієнти регресії визначали за залежностями

$$\left.\begin{aligned} b_0 &= \frac{1}{n}\sum_{u=1}^{n}\bar{y}_u; \\ b_i &= \frac{1}{n}\sum_{u=1}^{n}x_{iu}\bar{y}_u; \\ b_{ij} &= \frac{1}{n}\sum_{u=1}^{n}x_{iu}x_{ju}\bar{y}_u, \end{aligned}\right\}$$

де x_{iu} – значення *i* –го кодованого фактора в рядку матриці в *u* –му досліді; x_{ju} – значення *j* –го кодованого фактора в рядку матриці в *u* –му досліді.

Таблиця 2.5 - Кодування факторів

Кодове значення факторів	*S* X_1	*V* X_2	*T* X_3
X_{i0}	*0.5*(ln 0.12+ +ln0.05)*	*0.5*(ln500+ +ln250)*	*0.5*(ln1.5+ +ln0.5)*
ΔX_i	*0.5*(ln 0.12- ln0,05)*	*0.5*(ln500- ln250)*	*0.5*(ln1.5- -ln0,5)*
X_{imax}	*Ln0.12*	*Ln500*	*ln1,5*
X_{imin}	*Ln0,05*	*ln250*	*ln0,5*

В натуральних координатах рівняння лінійної регресії визначаємо за формулою

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^{n} b_i\left(\frac{X_i - X_{i0}}{\Delta X}\right).$$

Дисперсія S_u^2 $\sum_{u=1}^{8} S_u^2 = 0{,}0552$.

Оцінка відтворюваності за критерієм Кохрена

$$G_{X_{сер}} = \frac{0{,}0113}{0{,}0552} = 0{,}20471.$$

Табличне значення критерію Кохрена становить $G_T(0{,}05;8;16)=0{,}246$, умова відтворення процесу виконується $G < G_T$.

Дисперсія відтворюваності

$$S_y^2 = \frac{0{,}0552}{8} = 0{,}0069.$$

Рівняння регресії має такий вигляд:

$$y = 3{,}149 + 0{,}416x_1 - 0{,}062x_2 + +0{,}549x_3 + 0{,}035x_1x_2 + 0{,}029x_1x_3 - 0{,}03x_2x_3$$

Дисперсія адекватності $S^2_{ad} = 0{,}006046$.

Адекватність рівняння перевіряли за критерієм Фішера.

F=0.006046/0.0069 = 0.876<F(0.05;4,72)=2

Отримане рівняння лінійної регресії адекватно відтворює результати експерименту.

Перевірка значущості коефіцієнтів регресії.

Число ступенів вільності дисперсії відтворюваності: $f_y = 8(10-1) = 72$.

Критерій Стьюдента $t(0{,}05;72) = 2$.

Середнє квадратичне значення

Sy=$(6{,}9*10^{-3})^{0.5}$=0,0831.

Довірчий інтервал $\Delta b = 2 * 0{,}083/80{,}5 = 0{,}029368$.

Усі коефіцієнти рівняння менші довірчого інтервалу відкидаємо, тому рівняння регресії набуває такого вигляду:

$$y = 3.149 + 0{,}416x_1 - 0{,}062x_2 + 0{,}549x_3.$$

В натуральних координатах рівняння лінійної регресії має вигляд:

$$Pz = 877{,}79\, S^{0{,}95}\, V^{-0{,}18}\, t.$$

Таким же чином отримано рівняння лінійної регресії для визначення всіх параметрів технологічного процесу формоутворення сферичних поверхонь з використанням запропонованого пристрою.

Література

1. В.Є. Юмашев. Забезпечення постійної шорсткості при фрезеруванні 3d-поверхонь сферичними кінцевими фрезами на верстатах з ЧПУ Вісник ЖДТУ № 2 (53) - 2009
2. Ko J.H. Mechanistic cutting force model for micro ball-end milling / J.H. Ko, U.Heisel // ICOMM. –2007. – № 31.
3. А. Л. Струтинська. Визначення пружних характеристик сферичної опори ковзання вібраційного механізму / Вібрації в техніці та технологіях ВНАУ//2010. № 3/
4. Пат. 2056976 Российская Федерация, МПК B23B5/36. Обработка фасонных поверхностей на токарных станках / Лещев В.С.; заявитель и патентообладатель Акционерное общество открытого типа "Ролтом". – №93003815/08–93; заявл. 25.01.1993; опубл. 27.03.1996, Бюл. № 2.
5. Пат. 2133656 Российская Федерация, МПК B23B5/40. Способ растачивания сферических поверхностей отверстий / Холмогорцев Ю.П., Сайбель П.Ф.; заявитель и патентообладатель Акционерное общество "Уралтрак". – №94016501/02–96; заявл. 04.05.1994; опубл. 27.07.1999, Бюл. № 4.
6. Деклараційний патент №14336 Україна, МПК B23B5/00. Пристрій для розточування сфер / Левкович М.Г. – №200510457; заявл. 07.11.2005; опубл. 15.05.2006, Бюл. №5.
7. Планирование эксперимента в исследованиях технологических процессов / Перевод с немецкого. К. Хартан, Э. Лецкий, В. Шефер и др. – М.: Мир, 1977. – 552 с.
8. Налимов В.В. Статистические методы планирования эксперимента.-М.: Наука, 1970.- 378с.

Н. Пидгурский,. М. Левкович, О. Лясота. Исследование формообразования сферических поверхностей на станках токарной группы.

В работе исследовано влияние геометрических параметров узлов и деталей предлагаемого устройства - инструмента, точность их взаимного расположения, а также точность расположения осей направляющих оснастки на процесс формообразования сферических поверхностей..

N.Pidgyrsky, M. Levkovich, O. Lyasota. Research of forming process of spherical surfaces Lathes Group.,

In this paper the impact of geometric parameters of proposing units and details is research. Precision of relative positioning of guide axles of tooling on the forming process of spherical surfaces is determined.