

В.Є. Юмашев, к.т.н., доц.
О.А. Степчин, інж.

Житомирський державний технологічний університет

ШОРСТКІСТЬ ПОВЕРХНІ ПРИ РАСТРОВОМУ ФРЕЗЕРУВАННІ СФЕРИЧНИМИ ФРЕЗАМИ ПРОСТОРОВО-СКЛАДНИХ ПОВЕРХОНЬ

У статті встановлено зв'язок між напрямком руху фрези при растровому фрезеруванні сферичними пальцевими фрезами та шорсткістю обробленої поверхні. Показано залежність між вектором руху і вектором вібрації при обході фрезою просторово-складної поверхні. Запропоновано рекомендації по оптимізації вибору напрямку подачі фрези в залежності від кута нахилу твірної поверхні до основи.

Вступ. Фрезерування сферичними фрезами просторово-складних поверхонь в останній час знаходить широке практичне застосування у різних галузях промислового виробництва. В сучасних умовах конкуренції між підприємствами воно забезпечує підвищення продуктивності праці, зниження собівартості обробки та дозволяє суттєво поліпшити якість поверхні, що обробляється.

Цей вид обробки матеріалів широко використовується та розвивається у країнах із передовими технологіями. Проводяться наукові дослідження теоретичних основ і практичних результатів лезової обробки цим методом, встановлюються можливості отримання максимальної точності розмірів поверхні, що оброблюються та мінімізації шорсткості після обробки. Розроблено та виготовлено широкий спектр інструментів для 3-D; 4-D та 5-D фрезерування.

При виробництві автомобілів фрезерування сферичними фрезами використовується для виготовлення моделей, пресових штампів, детонаційних інструментів, форм, що відливаються під тиском. В електротехнічній та електронній промисловості найбільш поширеним є застосування сферичних фрез для виробництва зразків та моделей всіх видів, електродів для електроерозійної обробки, виготовлення загартованих насадок інструментів. В авіаційній промисловості ця технологія використовується при 4-х та 5-ти осевій обробці деталей зі складним профілем із алюмінію та титану, з'єднувальних елементів зі скла, пластику або композита, виготовлення лопатей і турбін літаків, газових і парових машин [1, 3, 6]. В декоративно-прикладному мистецтві виготовляються предмети символіки та геральдики, пам'ятні знаки і печатки, художні вироби із кістки, дерева, металу [7].

Широке впровадження цього виду обробки матеріалів стало можливим завдяки таким умовам:

- з'явилися нові конструкції верстатів із підвищеним ступенем жорсткості вузлів та швидкістю обертання шпинделів;
- розроблені системи ЧПК та програмне забезпечення до них, які в змозі гарантувати точну обробку просторово-складних поверхонь;
- почав випускатися фрезерний інструмент нової конструкції і геометрії з використанням передових різальних матеріалів.

Таким чином, вивчення процесу обробки просторово-складних поверхонь сферичними фрезами має велике значення і перспективу впровадження у виробництво як сучасного методу лезової обробки.

При обробці просторово-складних поверхонь сферичними фрезами можливі два варіанти побудови траєкторії переміщення інструмента. Перший – по лініям січних площин, що розташовані перпендикулярно до осі обертання фрези (умовно-контурний). Другий – по лініям січних площин, що розташовані паралельно до осі обертання фрези (умовно-растровий) [2, 4]. При растровому фрезеруванні має велике значення напрямок руху фрези: знизу доверху або зверху донизу.

Мета роботи. Встановити зв'язок і залежність між шорсткістю обробленої просторової поверхні та вібраціями, що виникають під час фрезерування. Дослідити вплив напрямку подачі фрези і кута нахилу твірної поверхні на амплітуду вібрацій та шорсткість.

Основна частина. Як відомо, одним із факторів, що впливають на шорсткість поверхні після обробки є вібрації, які виникають під час різання. На амплітуду і частоту цих вібрацій впливають різні умови, але виникають вони в основному під дією сил різання. Напрямок і величина коливань системи в процесі обробки значною мірою будуть залежати від точки прикладення та напрямку рівнодіючої цих сил.

Якщо представити рівнодіючу сил різання R_{xy} як суму двох складових: радіальної R_r та осевої R_o , то їх вплив на процес різання буде сприяти виникненню вібрацій у площинах відповідно перпендикулярній та паралельній до осі фрези.

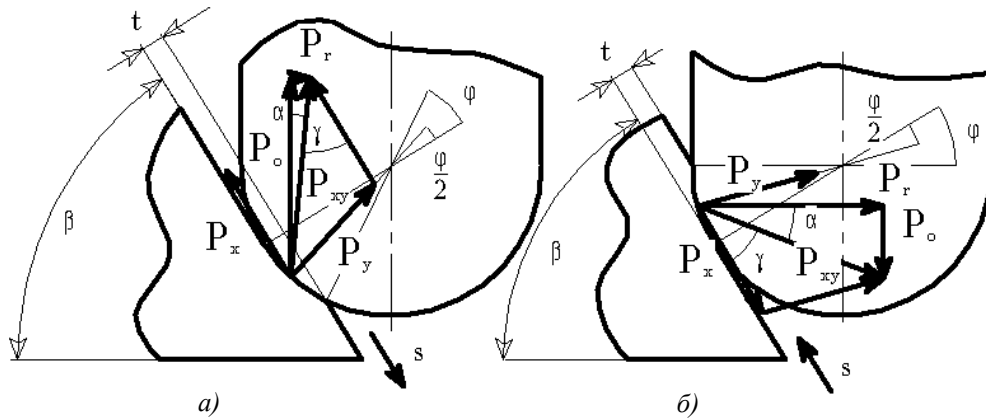


Рис. 1. Векторна схема сил при фрезеруванні сферичною фрезою при $\beta > 45^\circ$:
 а – переміщення фрези зверху донизу; б – переміщення фрези знизу доверху

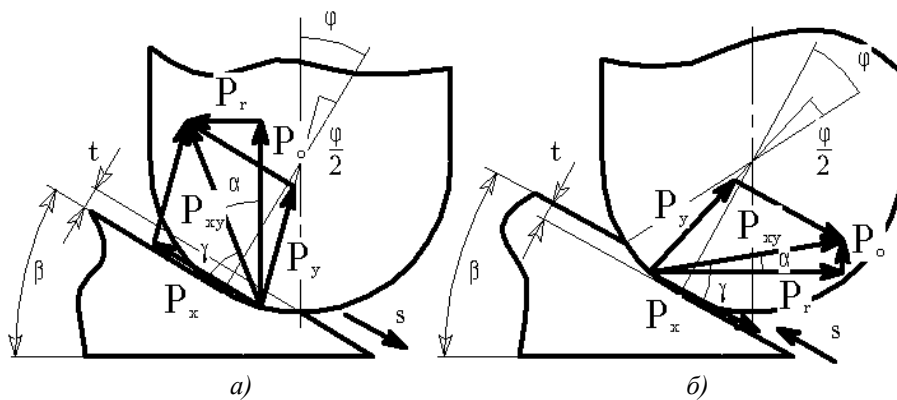


Рис. 2. Векторна схема сил при фрезеруванні сферичною фрезою при $\beta < 45^\circ$:
 а – переміщення фрези зверху донизу; б – переміщення фрези знизу доверху

При переміщенні фрези вздовж твірної поверхні, що оброблюється, вектор сили P_y направлений по радіусу до центру сферичної частини фрези. Вектор сили P_x є паралельним до напрямку подачі, а дія його зворотна напрямку подачі. При цьому, якщо фреза рухається знизу доверху рівнодіюча цих сил P_{xy} має більш визначений радіальний напрямок ($P_r > P_o$), а при русі зверху донизу – осьовий напрямок ($P_o > P_r$) відносно вертикальної осі фрези (рис. 1, 2). Вектор P_z при обох напрямках руху фрези спрямований в один і той самий бік – проти обертання шпинделя. Вплив цієї сили буде вочевидь однаковим на вібрації в випадках, що розглядаються. Таким чином можна зробити припущення, що при збільшенні частоти обертання фрези буде зростати сила удару ріжучої кромки о поверхню деталі. Це спричинить зростання амплітуди вібрацій як радіальних, так і осьових.

В запропонованій розрахунковій схемі приймаємо умови: $P_x = 0,5 \cdot P_z$; $P_y = 0,4 \cdot P_z$ [5].

Тоді у випадку руху фрези знизу доверху:

$$P_{xy} = \sqrt{P_x^2 + P_y^2 - 2P_x P_y \cos(90^\circ + \frac{\varphi}{2})}, \tag{1}$$

де величина кута вираховується таким чином:

$$\varphi = \arccos\left(\frac{R_o - t}{R_o}\right). \tag{2}$$

Радіальна і осьова складові можуть бути визначені за формулами:

$$P_r = P_{xy} \cdot \cos \alpha; \tag{3}$$

$$P_o = P_{xy} \cdot \sin \alpha. \tag{4}$$

Кут між вектором рівнодіючої P_{xy} і радіальною складовою P_r :

$$\alpha = \gamma - (90^\circ - \beta - \frac{\varphi}{2}). \tag{5}$$

В свою чергу, кут між вектором рівнодіючої P_{xy} і силою P_x :

$$\gamma = \arccos\left(\frac{P_x^2 + P_{xy}^2 - P_y^2}{2P_x P_{xy}}\right). \quad (6)$$

В наведених вище формулах та рисунках: φ – кут контакту фрези з оброблюваною поверхнею; β – кут нахилу твірної оброблюваної поверхні до основи; R_ϕ – радіус сферичної частини фрези; t – глибина різання; S – напрямок подачі фрези.

Виходячи з формул та розрахункових схем (рис. 1, б; 2, б), очевидно, що при русі фрези знизу доверху радіальна складова P_r більша ніж осьова P_o при будь-яких кутах β нахилу твірної оброблюваної поверхні до основи. Напрямок дії P_r – до осі фрези. Окрім цього, треба зауважити, що при кутах нахилу твірної $\beta > 45^\circ$, складова P_o спрямована на донизу, при $\beta < 45^\circ$ – доверху. При кутах β близьких до 45° , складова $P_o \approx$ приблизно дорівнює 0, а P_r наближена до $\approx P_{xy}$.

У випадку руху фрези зверху донизу (рис. 1, а; 2, а) змінюються рівняння (3) та (4):

$$P_r = P_{xy} \cdot \sin \alpha; \quad (7)$$

$$P_o = P_{xy} \cdot \cos \alpha, \quad (8)$$

де кут між вектором рівнодіючої P_{xy} та осьовою складовою P_o знаходиться, як і раніше:

$$\alpha = \gamma - \left(90^\circ - \beta - \frac{\varphi}{2}\right). \quad (9)$$

Зі схеми видно, що осьова складова P_o рівнодіючої P_{xy} більша радіальної P_r при будь-яких кутах β нахилу твірної поверхні, що обробляється до основи і завжди направлена доверху. Складова P_r при кутах нахилу твірної $\beta > 45^\circ$ направлена до осі фрези, а при $\beta < 45^\circ$ – від осі фрези. При кутах β близьких до 45° складова P_r приблизно дорівнює 0, а P_o наближена до $\approx P_{xy}$.

Під час обробки радіальна і осьова складові рівнодіючої сил різання направлені під різними кутами до твірної поверхні, що оброблюється. Величини цих кутів будуть визначатися нахилом самої твірної. В залежності від напрямку дії сил виникатимуть вібрації відповідного напрямку.

Вочевидь, що основною мірою на висоту мікронерівностей впливатимуть ті вібрації, вектор яких має більший кут до твірної поверхні, що обробляється. Саме вони будуть мати профілеутворюючий характер. Вібрації, що діють під малим кутом до поверхні даватимуть згладжуючий ефект.

Коли кут нахилу твірної поверхні, що оброблюється β наближений до 90° , то здебільшого впливати на шорсткість мають радіальні вібрації. При переміщенні фрези зверху донизу величина вектора P_r менша, ніж при русі знизу доверху (рис. 1, а; 1, б), меншими повинні бути і радіальні вібрації. Виходячи з цього, можна припустити, що направлення подачі донизу для даного випадку буде більш прийнятним.

При кутах нахилу твірної β близьких до 0° на шорсткість в основному будуть впливати вібрації осьового напрямку. Коли подача направлена доверху, вектор P_o менший (рис. 2, а; 2, б), відповідно меншими будуть осьові вібрації і саме такий вектор подачі забезпечить, за інших рівних умов, меншу шорсткість.

У випадках, коли величина кута β буде близькою до 45° , направлення подачі не матиме значного впливу на амплітуду вібрацій і висоту нерівностей.

Для експериментального обґрунтування наведеного вище припущення було проведено фрезерування сплаву алюмінію марки Д-16. Заготовками слугували пластинки, які кріпилися на жорсткому пристосуванні і виставлялися під кутом 30° та 60° до основи. Фрезерування виконувалось фрезою з швидкоріжучої сталі $\varnothing 8$ з радіусом заокруглення сферичної частини 4 мм. Експерименти проводились на трьох різних швидкостях. Для обробки використовувався вертикальний гравірувально-фрезерувальний верстат із системою управління Mach3Mill. Під час різання вимірювалися вібрації по осям верстата Z та Y (для вище приведеного позначення осей та радіальні відповідно). Амплітуда коливань встановлювалась п'єзоелектричними датчиками моделі ДН-4. Показання фіксувалися та оброблювалися за допомогою комп'ютерної програми LGraph2. На оброблених ділянках була виміряна шорсткість профілеграфами моделей 296 і 253. Опрацьовані результати вимірювань наведені в таблиці 1.

Під час аналізу отриманих результатів для кута $\beta = 60^\circ$ необхідно, в першу чергу, звертати увагу на амплітуду радіальних вібрацій. З таблиці 1 видно, що для всіх значень частоти обертання фрези, ці коливання мають меншу величину під час руху фрези зверху–вниз, ніж при русі фрези знизу–догори. У випадку кута $\beta = 30^\circ$ необхідно порівнювати амплітуди осьових вібрацій. Вочевидь, що вони мають менші значення, коли фреза рухається знизу доверху.

Наведені в останньому стовбці таблиці, параметри шорсткості оброблених поверхонь, своїми величинами в цілому повторюють співвідношення амплітуд коливань за відповідними напрямками.

Якщо порівняти коливання при різних частотах обертання шпинделя верстата, стає зрозумілим, що їх величина зростає зі зростанням кількості обертів фрези. Ця залежність повторюється у всіх розглянутих випадках. Хоча необхідно зауважити, що зміни параметрів не пропорційні.

Таблиця 1

Кут нахилу твірної до основи, β°	Частота обертання фрези n , хв. ⁻¹	Напрямок фрезерування	Середня амплітуда вібрацій, А (вольт)		Шорсткість поверхні R_a , мкм
			осьові вібрації	радіальні вібрації	
60°	10000	догори	0,0081	0,0072	1,56
		вниз	0,0104	0,0061	1,29
	17000	догори	0,0132	0,0078	1,39
		вниз	0,0180	0,0064	1,17
	25000	догори	0,0142	0,0082	1,15
		вниз	0,0220	0,0068	1,10
30°	10000	догори	0,0093	0,0094	1,56
		вниз	0,0124	0,0140	1,98
	17000	догори	0,0125	0,0096	1,58
		вниз	0,0138	0,0144	1,68
	25000	догори	0,0128	0,0098	1,36
		вниз	0,0132	0,0152	1,66

Висновки. Отримані експериментальні дані в цілому підтверджують теоретичні припущення і можуть слугувати основою для практичних рекомендацій при виборі напрямку руху фрези під час обробки просторової поверхні. А саме, для кутів нахилу твірної $\beta > 45^\circ$, кращу шорсткість забезпечить подача зверху донизу, а для кутів $\beta < 45^\circ$ – знизу доверху.

В масиві вимірювань шорсткості оброблених поверхонь деякі дані протирічають наведеним теоретичним припущенням та зробленим висновкам, що вимагає продовження досліджень та включення в експерименти обробки інших металів та сплавів, розширення діапазонів швидкостей та подач.

Потрібна перевірка отриманих результатів на сучасних фрезерних верстатах промислового типу. Це необхідно, тому що додатково проведені вимірювання жорсткості верстата за різними осями координат встановили, що використаний верстат має малу жорсткість та є нерівно жорстким по різним напрямкам. Так по осі Z (вертикальній) його жорсткість значно менша, ніж по X та Y (повздовжній та поперечній). А саме, по осі Z виміряна жорсткість $I_z = 30,3$ кг/мм, по осі X величина $I_x = 45,0$ кг/мм, по осі Y – $I_y = 60,2$ кг/мм. Цей факт вносить значну похибку і деяку невідповідність в експериментальні данні. Особливо це видно при взаємному порівнянні величин осьових та радіальних вібрацій. Амплітуди осьових, в більшості результатів вимірювань, значно перевищують амплітуди радіальних. Таке співвідношення не характерне для промислових фрезерних верстатів із вертикальним шпинделем. Осьова жорсткість системи СПІД таких верстатів значно перевищує радіальну, що виключає переважання осьових коливань. Виявлена специфіка верстата впливає на практичні результати вимірювань.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Алиев Р. Высокоскоростное фрезерование литейных форм / Р.Алиев, Д.Гантнер // САПР и графика. – 2004. – № 7.
2. Мельничук П.П. Аналіз траєкторій чистової обробки при 3D фрезеруванні на верстатах з ЧПУ / П.П. Мельничук, В.Б. Струтинский, В.Є. Юмашев // Методи розв'язання прикладних задач механіки деформованого твердого тіла. – 2010. – Вип. 11.
3. Гайсин Н. Применение САМ-системы Power Mill для изготовления литейной оснастки / Н.Гайсин // САПР и графика. – 2008. – № 9.
4. Юмашев В.Є. Забезпечення постійної шорсткості при фрезеруванні 3D поверхонь сферичними кінцевими фрезами на верстатах з ЧПУ / В.Є. Юмашев, О.О. Штегін // Вісник ЖДТУ / Технічні науки. – 2010. – № 2 (53). – С. 56–60.
5. International Journal of Machine Tools & Manufacture. – 2004. – V. 44, Nr. 2/3 (февраль).

6. Упрощенный способ определения коэффициентов сил резания, возникающих при фрезеровании концевыми сферическими фрезами, путем создания механической модели сил резания / *A.Azeem et al.* – С. 291–298.
7. *Степанов А.* Высокоскоростное фрезерование в современном производстве/ *А.Степанов* // Инженерный консалтинг. – М. : Машиностроение и смежные отрасли.
8. *Феоктистов В.* Декоративно-прикладное искусство с ЧПУ / *В.Феоктистов*// САПР и графика. – 2010. – № 9.

ЮМАШЕВ Володимир Євгенович – кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування та конструювання технічних систем Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

– робототехніка, верстати з ЧПУ.

СТЕПЧИН Олег Анатолійович – інженер кафедри технології машинобудування та конструювання технічних систем Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

– теорія різання, верстати з ЧПУ.

Подано 16.12.2010

