

УДК 621.914

В.Є. Юмашев, к.т.н., доц.  
О.О. Штегін, магістрант

Житомирський державний технологічний університет

### ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПОСТІЙНОЇ ШОРСТКОСТІ ПРИ ФРЕЗЕРУВАННІ 3D-ПОВЕРХОНЬ СФЕРИЧНИМИ КІНЦЕВИМИ ФРЕЗАМИ НА ВЕРСТАТАХ З ЧПУ

У статті розглянуто явище змінності шорсткості обробленої поверхні внаслідок зміни швидкості різання при обробці опуклих/ввігнутих поверхонь сферичними фрезами. Запропоновано алгоритми для корекції режимів різання з метою забезпечення сталої шорсткості обробленої поверхні.

**Вступ.** Класичний технологічний процес обробки 3D-поверхонь відбувається в три етапи [1]. На першому етапі – чорновому фрезеруванні – обробка ведеться циліндричними кінцевими фрезами. В результаті виходить наближений контур деталі у вигляді ступінчастої поверхні. На другому етапі отриманий ступінчастий контур за допомогою сферичної фрези наближається до заданого контуру. Останній етап виконується також сферичною фрезою, за допомогою якої виконується чистова обробка й остаточне формування 3D-поверхні.

Ця технологія добре проілюстрована на рисунку 1 [2].

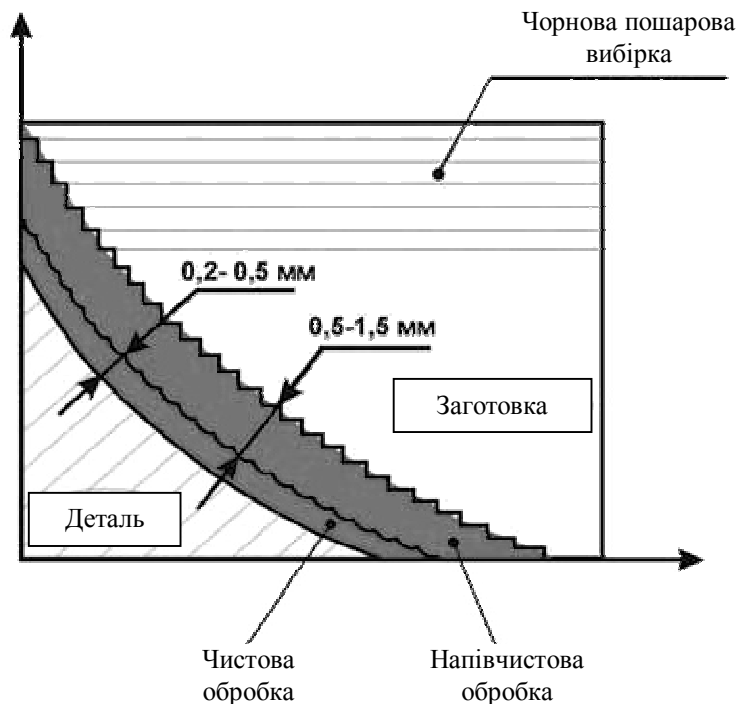


Рис. 1. Діапазони припусків за видами обробки

З рисунка видно, що рекомендовані глибини різання для остаточної обробки становлять 0,2–0,5 мм. Однак, навіть при таких глибинах різання, процес фрезерування сферичними фрезами не забезпечує стаціонарних умов обробки і залежить від точки контакту сферичної частини фрези з поверхнею, що обробляється. Швидкість різання за таких умов може змінюватися залежно від значення, заданого в програмі обробки, і до нуля.

У ряді робіт проведені дослідження сил різання, які виникають за таких умов фрезерування, з метою забезпечення необхідної точності обробки [3–6]. Але при остаточному фрезеруванні важливо не тільки досягти точності, що вимагається, але й отримати необхідну шорсткість поверхні, що обробляється, яка в умовах нестационарного фрезерування не буде постійною на різних ділянках поверхні.

**Мета роботи.** Визначення характеру зміни шорсткості поверхні при 3D-фрезеруванні на верстатах з ЧПУ сферичними кінцевими фрезами і вибір відповідної стратегії обробки, що забезпечує сталість шорсткості поверхні.

**Основна частина.** При фрезеруванні складних 3D-поверхонь сферичними кінцевими фрезами, при постійній частоті обертання шпинделя верстата, реальна швидкість різання буде змінюватися в точці контакту фрези з обробленою поверхнею залежно від радіуса сферичної частини фрези і кривизни поверхні, що обробляється (рис. 2, а, б). Відповідно, шорсткість обробленої 3D-поверхні буде неоднаковою на різних ділянках.

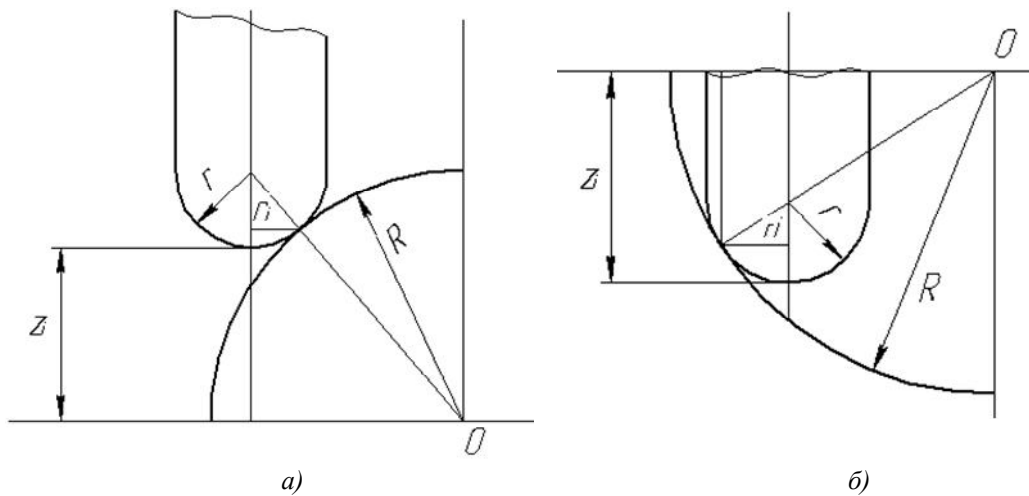


Рис. 2. Фактичний радіус сферичної фрези в точці контакту з обробленою поверхнею

Якщо розглянути обробку сферичних поверхонь, то радіус фрези в точці контакту  $r_i$  можна визначити за (1) для обробки опуклої півсфери і за (2) для ввігнутої.

$$r_i = \frac{r}{R+r} \sqrt{(R+r)^2 - (r+Z)^2}; \quad (1)$$

$$r_i = \frac{r}{R-r} \sqrt{(R-r)^2 - (Z-r)^2}, \quad (2)$$

де  $R$  – радіус кривизни поверхні, що обробляється;  $r$  – радіус сферичної частини кінцевої фрези;  $Z$  – відстань по координаті  $Z$  від нульової площини, яка проходить через центр сферичної поверхні, до торця фрези.

Найскладнішою ділянкою для обробки буде місце 3D-поверхні, де  $Z = R$ . В цьому випадку радіус контакту фрези буде дорівнювати нулю і, відповідно, швидкість різання також буде дорівнювати нулю.

Аналогічно можна визначити радіус фрези в точці контакту і при обробці похилих площин. У цьому випадку він буде залежати лише від кута нахилу площини, що обробляється, до площини, яка перпендикулярна до осі фрези.

Знаючи радіус фрези в точці контакту, можна визначити дійсну швидкість різання і за необхідності її корегувати. Або корегувати подачу з метою забезпечення постійної шорсткості поверхні.

Залежно від можливостей верстата слід обирати і стратегію обробки 3D-поверхонь, щоб забезпечити постійну шорсткість на всіх ділянках обробки. Наприклад, для чистового фрезерування сферичних поверхонь можливі два варіанти побудови траєкторій переміщень інструмента – переміщення по січних лініях у площині, розташованій паралельно до площини осі фрези (рис. 3, а), і по лініях у площині, розташованих перпендикулярно площині осі фрези (рис. 3, б).

Для варіанта стратегії, зображеного на рисунку 3, а, можливий лише один спосіб підтримки постійної шорсткості поверхні – якщо система ЧПУ верстата дозволяє задавати закон зміни швидкості обертання шпинделя у процесі переміщення інструмента по заданій траєкторії. Іншими словами, якщо можлива підтримка постійної швидкості різання на різних ділянках траєкторії, то така стратегія обробки є більш доцільною. В цьому випадку обробку можна вести з постійною подачею, що підвищує продуктивність обробки.

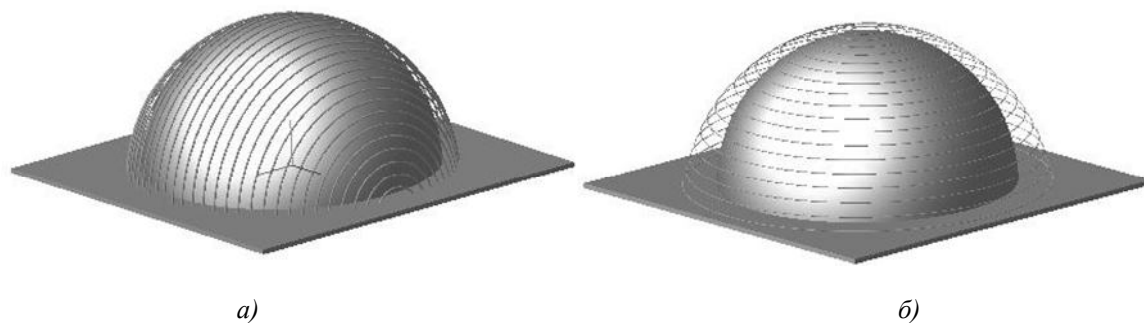


Рис. 3. Стратегії обробки при фрезеруванні сферичних поверхонь

Для варіанта стратегії, зображеного на рисунку 3, б, можливо застосувати зміну як швидкості різання, так і подачі. В цьому випадку немає необхідності задавати закон зміни частоти обертання шпинделя через систему ЧПУ верстата. Швидкість різання можна змінювати програмно в керуючій програмі, при переході з одного рівня траєкторії на інший, якщо це дозволяє конструкція верстата і його система ЧПУ. При використанні малогабаритних верстатів з ЧПУ або верстатів з ЧПУ, в яких застосовується ступінчаста зміна частоти обертання шпинделя, можна рекомендувати програмно задавати короточасні зупинки переміщення інструмента при переході з одного рівня на інший. Під час такої зупинки вручну змінюється частота обертання шпинделя, що забезпечить постійність швидкості різання і, відповідно, шорсткості. Недоліком такого способу є зниження продуктивності обробки.

При такій стратегії обробки можна змінювати подачу, задаючи її необхідні значення в керуючій програмі при переході з одного рівня траєкторії на інший.

Для визначення величини корекції швидкості різання або подачі можна застосувати формулу для розрахунку параметра шорсткості  $R_a$  при фрезеруванні кінцевими фрезами, що пропонується в [7]:

$$R_a = CV^k f_z^l a^m \text{ (мкм)}, \tag{3}$$

де  $V$  – швидкість різання (м/хв.);  $f_z$  – подача на зуб кінцевої фрези (мм/зуб);  $a$  – глибина різання (мм);  $C$ ,  $k$ ,  $l$ ,  $m$  – коефіцієнт пропорційності і відповідні показники степеня, які залежать від матеріалу, що обробляється.

В цій же роботі пропонується методика експериментального визначення коефіцієнта  $C$  і показників степеня  $k$ ,  $l$  і  $m$ , які можна використовувати при обробці різних матеріалів.

Визначивши за (3) значення швидкості різання або подачі, які забезпечують необхідні значення параметра шорсткості  $R_a$ , і знаючи характер зміни радіуса сферичної частини кінцевої фрези в точці контакту з поверхнею, що обробляється, можна вводити корекцію на частоту обертання шпинделя або робочу подачу інструмента вздовж траєкторії обробки.

Чистова обробка 3D-поверхонь, як уже зазначалося вище, ведеться на глибинах різання в межах 0,2–0,5 мм. Викликає певний інтерес питання, який характер буде мати зміна шорсткості поверхні залежно від режимів різання і, в першу чергу, від швидкості різання при таких малих глибинах.

З цією метою проведено експериментальні дослідження фрезерування алюмінієвого сплаву Д16 кінцевими фрезами діаметром 8 мм зі швидкорізальної сталі Р6М5. Обробка велася циліндричною частиною фрези на різних швидкостях різання шляхом зміни частоти обертання шпинделя на фрезерному верстаті з ЧПУ. Іншими словами, був змодельований процес зміни радіуса сферичної частини кінцевої фрези в точці контакту з поверхнею, що обробляється, при якому змінюється швидкість різання при постійній частоті обертання шпинделя. Фрезерування проводилося на глибинах різання 0,25 мм і 0,3 мм з відповідними хвилинними подачами 10 мм/хв. і 20 мм/хв. Вимірювання шорсткості проводилося за допомогою приладу «Профілометр 296».

Результати експериментальних досліджень наведені в таблиці 1 і на рисунку 4.

Таблиця 1

$V$ , м/хв.	251,2	427,04	527,52	577,76	628	678,24
Глибина різання $t = 0,25$ мм, подача $S = 10$ мм/хв.						
$R_a$ , мкм	3,18	2,38	1,94	2,03	1,7	1,28
Глибина різання $t = 0,3$ мм, подача $S = 20$ мм/хв.						
$R_a$ , мкм	2,45	2,17	1,58	1,52	1,36	1,09

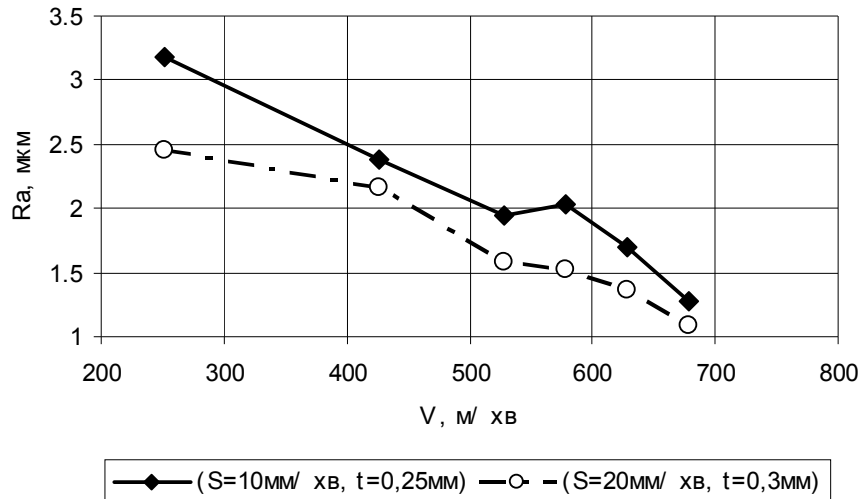


Рис. 4. Графік зміни параметра шорсткості  $R_a$  залежно від швидкості різання

Аналіз наведених результатів показує, що зменшення швидкості різання однозначно призводить до погіршення шорсткості поверхні, що обробляється. Вплив подачі на шорсткість має дещо інший характер, ніж очікувалося. При збільшенні подачі з 10 мм/хв. до 20 мм/хв. параметр шорсткості зменшився, а не збільшився, що відбувається при звичайних глибинах різання. В рамках даної статті не ставилося питання вивчення впливу подачі на шорсткість обробленої поверхні при малих глибинах різання. Це питання потребує додаткового вивчення і досліджень.

Для забезпечення сталої величини шорсткості на всій поверхні обробленої деталі необхідно або забезпечити постійне значення множника  $V^k$  у (3), або компенсувати його зміну відповідною зміною іншого множника.

Для реалізації першого шляху забезпечення сталості шорсткості обробленої поверхні система ЧПУ верстата повинна дозволити вводити оперативну корекцію швидкості обертання шпинделя. Іншими словами:

$$V = \frac{2\pi n}{1000} = \text{const при } rn = r_i n_i = \text{const.} \quad (4)$$

Підставивши у (4) відповідні формули для визначення змінного радіуса  $r_i$ , маємо для обробки опуклої і ввігнутої поверхонь такі вирази:

$$n_i = \frac{R+r}{\sqrt{(R+r)^2 - (r+Z)^2}} \cdot n; \quad (5)$$

$$n_i = \frac{R-r}{\sqrt{(R-r)^2 - (Z-r)^2}} \cdot n, \quad (6)$$

де  $n$  – номінальна швидкість обертання фрези, прийнята для вихідного діаметра фрези.

Якщо немає можливості змінювати під час обробки оберти шпинделя верстата, підходить другий зазначений варіант – уведення корекції на подачу згідно з (3).

Тобто повинна забезпечуватися така рівність:

$$V^k f_z^l = \text{const.} \quad (7)$$

Якщо розгорнути вираз для швидкості різання, то маємо:

$$\left(\frac{2\pi r_i n}{1000}\right)^k f_z^l = \text{const} \Rightarrow r_i^k = f_z^{-l}. \quad (8)$$

Виходячи з цього, для  $i$ -ої точки обробки, в якій реальний радіус фрези, який бере участь у різанні, матиме значення  $r_i$ , подача визначатиметься:

$$f_{zi} = r_i^{-\frac{k}{l}}. \quad (9)$$

Остаточні формули корегованої подачі для обробки опуклої і ввігнутої поверхонь на різних ділянках:

$$f_{zi} = \left(\frac{r}{R+r} \sqrt{(R+r)^2 - (r+Z)^2}\right)^{-\frac{k}{l}}; \quad (10)$$

$$f_{zi} = \left( \frac{r}{R-r} \sqrt{(R-r)^2 - (Z-r)^2} \right)^{\frac{k}{i}} \quad (11)$$

Зауважується, що при дослідженні і виведенні алгоритму введення корекції, згідно з (3), значення глибини різання  $a$  приймалося за сталу величину.

**Висновки.** Для забезпечення постійної шорсткості обробленої поверхні при 3D-фрезеруванні кінцевими сферичними фрезами на верстатах з ЧПУ необхідно враховувати зміну радіуса сферичної частини фрези в точці контакту з поверхнею, що обробляється. Зміна радіуса фрези призводить до зміни фактичної швидкості різання, при якій формується оброблена поверхня, що впливає на шорсткість. Відповідно до цього, необхідно обирати таку стратегію обробки 3D-поверхонь, при якій можлива корекція режимів різання з метою забезпечення постійної шорсткості по всій обробленій поверхні. Корекція виконується для швидкості різання, якщо є можливість змінювати швидкість обертання шпинделя верстата, для подачі для компенсації зміни швидкості різання.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Алиев Р. Составление оптимальной ЧПУ-программы для высокоскоростного фрезерования / Р.Алиев // САПР и графика. – 2002. – № 11.
2. Вермель В. Высокоскоростная фрезерная обработка в производстве технологической оснастки / В.Вермель, В.Зиняев // САПР и графика. – 2005. – № 2.
3. Trial-less machining using virtual machining simulator for ball end mill operation / H.Narita, L.Chen, H.Fujimoto etc. // JSME international journal : Series C. – 2006. – Vol. 49, № 1.
4. Bhavsar S.N. An approach for selection of variable feedrate for quality machining of sculptured surfaces / S.N. Bhavsar // IE(i) journal-PR. – Vol. 87. – March 2007. – Pp. 36–41.
5. Ko J.H. Mechanistic cutting force model for micro ball-end milling / J.H. Ko, U.Heisel // ICOMM. – 2007. – № 31.
6. Raksiri C. Geometric and force errors compensation in a 3-axis CNC milling machine / C.Raksiri, M.Parnichkun // International journal of Machine tools and manufacture. – 2004. – № 44. – Pp. 1283–1291.
7. Development of Surface Roughness Models in End Milling Titanium Alloy Ti-6Al-4V Using Uncoated Tungsten Carbide Inserts / T.L. Ginta, A.K.M.N. Amin, H.C.D.M. Radzi, M.A. Lajis // European Journal of Scientific Research. – 20089. – Vol. 28, № 4. – Pp. 542–551.

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

Наукові інтереси:

– робототехніка, верстати з ЧПУ.

ШТЕГІН Олексій Олександрович – магістрант кафедри технології машинобудування та конструювання технічних систем Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

– верстати з ЧПУ.

Подано 20.04.2010

**Юмашев В.Є., Штегін О.О.** Забезпечення постійної шорсткості при фрезеруванні 3D-поверхонь сферичними кінцевими фрезами на верстатах з ЧПУ

**Юмашев В.Е., Штегин А.А.** Обеспечение постоянной шероховатости при фрезеровании 3D-поверхностей сферическими концевыми фрезами на станках с ЧПУ

**Yumashev V.E., Shtegin A.A.** Securing of a constant surface roughness for CNC 3D-milling by ball-end mills

УДК 621.914

**Обеспечение постоянной шероховатости при фрезеровании 3D-поверхностей сферическими концевыми фрезами на станках с ЧПУ / В.Е. Юмашев, А.А. Штегин**

В статье рассмотрено явление переменности шероховатости обработанной поверхности вследствие изменения скорости резания при обработке выпуклых/вогнутых поверхностей сферическими фрезами. Предложены алгоритмы для коррекции режимов резания с целью обеспечения постоянной шероховатости обработанной поверхности.

УДК 621.914

**Securing of a constant surface roughness for CNC 3D milling by ball-end mills / V.E. Yumashev, A.A. Shtegin**

In article the phenomenon of surface roughness changing as a result of cutting speed change at convex/concave surfaces ball-end mill machining is considered. Algorithms for cutting conditions correction with securing of a constant surface roughness are proposed.