відповідно зменшується налипання матеріалу на передній поверхні інструмента, як результат, якість оброблюваної поверхні вища. При збільшенні швидкості подачі шорсткість обох заготовок зростала [3].

ЛІТЕРАТУРА

1 Veiga C., Davim J.P., Loureiro A. J. R. Properties and applications of titanium alloys: a brief review. *Rev. Adv. Mater. Sci*. 2012. № *32*(2), – С. 133–148.

2 Полупан А.С. Дослідження питання впровадження адитивних технологій в авіабудівну галузь. *Open Information and Computer Integrated Technologies*. 2020. № 88. – С. 112–122.

3 Polishetty A., Shunmugavel M., Goldberg M. та ін. Cutting Force and Surface Finish Analysis of Machining Additive Manufactured Titanium Alloy Ti-6Al-4V. *Procedia Manufacturing*. 2017. №7. – С. 284–289.

Полянський В.І.
ТОВ «Імперія металів»
Новіков Ф.В.
Харківський національний економічний університет
імені Семена Кузнеця

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ УМОВ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ТА ПРОДУКТИВНОСТІ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ

Сучасне машинобудування вимагає значного підвищення точності та продуктивності механічної обробки. Для цього застосовують ефективні технології високошвидкісної обробки на високообертових металорізальних верстатах із ЧПУ типу «обробний центр» та прогресивні різальні лезові твердосплавні й керамічні інструменти зі зносостійкими покриттями закордонного виробництва. Однак, як встановлено на практиці, ці технології недостатньо вивчено, фактично відсутні науково обґрунтовані рекомендації щодо вибору раціональних методів механічної обробки, режимів різання та характеристик різальних інструментів для їх ефективного застосування на вітчизняних промислових підприємствах. Це стримує їх впровадження у виробництво. Тому важливо теоретично встановити та обґрунтувати нові технологічні можливості підвищення точності та продуктивності механічної обробки. Для цього аналітично визначено пружні переміщення (похибки розміру та форми поверхні), які виникають під час точіння, шліфування, розточування, свердління і фрезеруванні та визначають точність обробки.

Під час точіння пружне переміщення y за проходами n визначається:

$$y_1 = \frac{t}{\left(1+\frac{c\cdot K_{різ}}{\sigma\cdot S\cdot \cos\varphi}\right)};\quad y_2 = \frac{t}{\left(1+\frac{c\cdot K_{різ}}{\sigma\cdot S\cdot \cos\varphi}\right)} + \frac{t}{\left(1+\frac{c\cdot K_{різ}}{\sigma\cdot S\cdot \cos\varphi}\right)^2};\quad y_n = \frac{\sigma\cdot Q\cdot \cos\varphi}{c\cdot K_{різ}\cdot V},$$

де c – приведена жорсткість технологічної системи, Н/м;

$K_{різ} = P_z / P_y$ – коефіцієнт різання;

$Q = S \cdot t \cdot V$ – продуктивність обробки, м^3/с;

S – подача, м/об.;

V – швидкість різання, м/с;

φ – головний кут різця в плані.

Під час круглого поздовжнього шліфування пружні переміщення y за n проходів круга визначаються аналогічними залежностями:

$$y_1 = \frac{t}{\left(1 + \frac{c \cdot K_ш \cdot V_{кр}}{\sigma \cdot H \cdot V_{дет}}\right)};\ y_2 = \frac{t}{\left(1 + \frac{c \cdot K_ш \cdot V_{кр}}{\sigma \cdot H \cdot V_{дет}}\right)} + \frac{t}{\left(1 + \frac{c \cdot K_ш \cdot V_{кр}}{\sigma \cdot H \cdot V_{дет}}\right)^2};\ y_n = \frac{\sigma \cdot Q}{c \cdot K_ш \cdot V_{кр}},$$

де $Q = H \cdot t \cdot V_{дет}$ – продуктивність обробки, м^3/с;

H – ширина шліфування, м;

$V_{дет}$, $V_{кр}$ – швидкості деталі та круга, м/с;

$K_ш = K_{різ}$.

Оскільки відношення $\sigma / K_{різ}$ під час точіння значно менше, ніж під час шліфування, то, незважаючи на умову $V_{кр} > V$, під час точіння можна досягти зменшення пружного переміщення y_n та, відповідно, підвищення точності й продуктивності обробки.

Обґрунтовано умови підвищення точності механічної обробки отвору лезовими інструментами. Для цього визначено похибку форми оброблюваного отвору (як різницю найбільшого y_1 і найменшого y_2 пружного переміщень в двох протилежних напрямах) під час розточування (рис. 1) за проходами інструмента за умови розбіжності осей різця та отвору на величину Δ:

$$\Delta y_1 = y_1 - y_2 = \frac{t_1}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{різ}}{\sigma \cdot S \cdot \cos\varphi}\right)} - \frac{t_2}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{різ}}{\sigma \cdot S \cdot \cos\varphi}\right)} = \frac{\Delta}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{різ}}{\sigma \cdot S \cdot \cos\varphi}\right)};$$

$$\Delta y_2 = \frac{t + y_1}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{різ}}{\sigma \cdot S \cdot \cos\varphi}\right)} - \frac{t + y_2}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{різ}}{\sigma \cdot S \cdot \cos\varphi}\right)} = \frac{\Delta}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{різ}}{\sigma \cdot S \cdot \cos\varphi}\right)^2};\ \Delta y_n = \frac{\Delta}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{різ}}{\sigma \cdot S \cdot \cos\varphi}\right)^n},$$

де $t_1 = t + \Delta$;

$t_2 = t$ – максимальна та мінімальна глибини різання, м.

Як видно, зі збільшенням кількості проходів інструмента n величина y_n прагне до нуля. Це дозволяє усунути похибку форми оброблюваного отвору у вигляді невісесиметричності. За умови ($\frac{c \cdot K_{різ}}{\sigma \cdot S \cdot \cos\varphi} > 1$) можна значно швидше домогтися заданої точності форми оброблюваної поверхні. Це досягається застосуванням технологій розточування отворів різцями із синтетичних

надтвердих матеріалів та сучасних збірних твердосплавних і керамічних різців зі зносостійкими покриттями закордонного виробництва.

Визначено похибку форми отвору під час його розсвердлювання зі зміщенням осі свердла відносно осі оброблюваного отвору на величину Δ:

$$y_1 = \frac{2 \cdot \sigma \cdot S \cdot \cos\varphi \cdot \Delta}{K_{різ} \cdot c}; \quad y_2 = \left(\frac{2 \cdot \sigma \cdot S \cdot \cos\varphi}{K_{різ} \cdot c} \right)^2 \cdot \Delta; \quad y_n = \left(\frac{2 \cdot \sigma \cdot S \cdot \cos\varphi}{K_{різ} \cdot c} \right)^n \cdot \Delta.$$

Сумарне уточнення $\varepsilon_{сум}$ та уточнення на проході ε визначаються:

$$\varepsilon_{сум} = \frac{\Delta}{y_n} = \left(\frac{K_{різ} \cdot c}{2 \cdot \sigma \cdot S \cdot \cos\varphi} \right)^n; \qquad \varepsilon = \frac{\Delta}{y_1} = \frac{y_1}{y_2} = \frac{y_2}{y_3} = \ldots = \frac{y_{n-1}}{y_n} = \frac{K_{різ} \cdot c}{2 \cdot \sigma \cdot S \cdot \cos\varphi}.$$

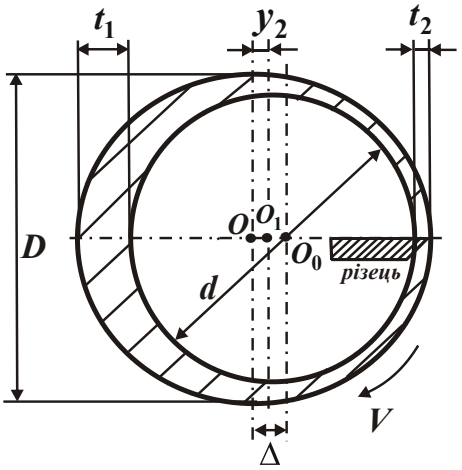

Рисунок 1 – Розрахункова схема пружного переміщення під час розточування отвору із початковим діаметром d

Виходячи із отриманого рішення, встановлено, що зі збільшенням проходів свердла пружне переміщення зменшується, а це приводить до збільшення похибки форми отвору. Тому обробку слід здійснювати за один прохід або за декілька проходів свердлами із різними діаметрами, збільшуючи діаметри свердел за проходами. Встановлено, що під час розсвердлювання отвору пружне переміщення (похибка форми оброблюваного отвору) більше, ніж під час його розточування.

Пружне переміщення під час розфрезерування отвору за n проходів:

$$y_1 = \frac{t}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{різ} \cdot V_{фр}}{\sigma \cdot H \cdot V_{дет}}\right)}; \qquad y_n = \frac{\sigma \cdot Q}{c \cdot K_{різ} \cdot V_{фр}},$$

де $Q = H \cdot t \cdot V_{дет}$ – продуктивність обробки, м^3/с;

H – ширина фрезування, м;

$V_{дет}$, $V_{фр}$ – швидкості деталі та фрези, м/с.

Оскільки під час високошвидкісного розфрезерування отвору відношення $\sigma / K_{різ}$ менше, ніж під час шліфування, а $V_{фр} \approx V_{кр}$, то в цьому випадку величина y_n буде меншою, що дозволяє підвищити точність та продуктивність обробки порівняно із шліфуванням. Це указує на ефективність застосування на фінішних операціях обробки отворів сучасних технологій лезової обробки замість технологій шліфування.

Рисунок 2 – Штуцер. Матеріал – берилієва бронза БрБНТ: n=1150 об/хв., S=0,05 мм/об., t=0,5 мм; Ra=0,8 мкм. Обладнання – EX910, TAKISAWA (Тайвань)

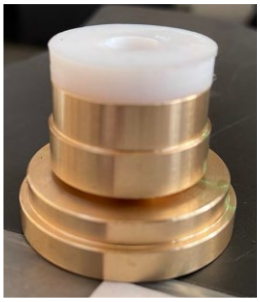

Рисунок 3 – Фільєра макаронна «макарон». Матеріал – тефлон і латунь ЛС59: n=1700 об/хв, S=0,02 мм/об., t=0,2 мм; Ra=0,8 мкм. Обладнання – EX910, TAKISAWA (Тайвань)

На основі отриманих теоретичних рішень розроблено та впроваджено у виробництво ТОВ «Імперія металів» сучасні технологічні процеси точіння, розточування та фрезування складнопрофільної формуючої оснастки для харчової промисловості (рис. 2, рис. 3). Вони засновані на застосуванні сучасних збірних лезових твердосплавних і керамічних різальних інструментів зі зносостійкими покриттями та сучасних високообертових металорізальних верстатів із ЧПУ типу «обробний центр». Це дозволило замінити малоефективні традиційні технологічні процеси лезової обробки, до 10 разів підвищити показники точності, якості та продуктивності обробки, що важливо в умовах переходу від великосерійного до дрібносерійного і штучного виробництва складнопрофільної формуючої оснастки для харчової промисловості.

Пошванюк В.А.
Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України

МОДЕЛЮВАННЯ ЯВИЩ У ЗОНІ РІЗАННЯ ЯК ЕФЕКТИВНИЙ ІНСТРУМЕНТ ВИВЧЕННЯ ПРОЦЕСУ ОБРОБКИ

Моделювання методами скінченних елементів (МСЕ) є одним із найефективніших інструментів для дослідження і вдосконалення процесів механічної обробки матеріалів. Завдяки своїй універсальності, МСЕ дозволяє дослідникам глибоко аналізувати явища, які відбуваються в зоні контакту інструменту з матеріалом, а також прогнозувати їхній вплив на кінцеві результати обробки.

Основними етапами моделювання є постановка задачі, створення моделі, вибір матеріальних властивостей, налаштування симуляції та аналіз отриманих результатів. На початковому етапі важливо визначити геометричні параметри оброблюваного матеріалу і інструменту, окреслити область контакту та сформулювати граничні умови. Наприклад, це можуть бути значення температур, швидкості подачі інструменту або тиску в зоні контакту. Після цього