

УДК 621.914

П.П. Мельничук, д.т.н., проф.
В.Ю. Лосєв, к.т.н., доц.
О.В. Головатенко, аспір.

ВПЛИВ ТОЧНОСТІ РОЗТАШУВАННЯ ФОРМОУТВОРЮЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТОРЦЕВОЇ ФРЕЗИ НА ПРОЦЕС РІЗАННЯ

В статті проведено аналіз впливу похибок розташування вершин різальних елементів фрези відносно осі обертання шпинделя верстата, а також їх взаємного кутового положення на розміри частини припуску, що видаляється кожним лезом торцевої фрези. Надані рекомендації щодо раціональної експлуатації торцевих фрез стандартної та спеціальної конструкції.

Постановка проблеми. В машинобудуванні при фінішній обробці плоских поверхонь деталей все більшого застосування набуває процес торцевого фрезерування інструментом з надтвердих матеріалів замість традиційного шліфування, що забезпечує не тільки підвищення якості і продуктивності обробки, але й сприяє зменшенню забруднення навколишнього середовища.

Розрахунок і призначення режимів різання при фінішній обробці плоских поверхонь торцевими фрезами проводять, як правило, з врахуванням отримання необхідних показників якості оброблюваної поверхні деталі, характеристик її матеріалу, інструментального матеріалу, технічних характеристик верстата, на якому планується обробка, а також в залежності від максимально можливої продуктивності праці.

При встановленні режимів фінішної обробки плоских поверхонь особливу увагу приділяють величині подачі на зуб торцевої фрези, яка має суттєвий вплив на утворювану шорсткість.

За даними [1] при радіусній формі різального елемента шорсткість визначають за формулою:

$$R_z = R - \frac{1}{2} \sqrt{(4R^2 - f^2)} \approx \frac{f^2}{8R},$$

де R – радіус закруглення леза, мм; f – подача на зуб, мм/зуб.

В роботі [2] шорсткість визначається за формулою:

$$R_z = 0,5 \left(D - \sqrt{D^2 - S_z^2} \right),$$

де $D = 2R$ – діаметр закруглення леза фрези, мм; S_z – подача на зуб, мм/зуб.

Подачу на зуб визначають спрощено, поділивши подачу на оберт на кількість ножів фрези:

$$S_z = \frac{S}{z}.$$

З подачею на зуб фрези пов'язують інші режими та параметри процесу обробки [2], зокрема:

– швидкість різання:
$$V = \frac{C_v \cdot D^q}{T_\phi^m \cdot t^x \cdot S_z^y \cdot B^n \cdot z^n},$$

де $T_{\phi p}$ – стійкість фрези; t – глибина різання; B – ширина фрезерування; z – кількість ножів; C_v, x, y, n, q і m – коефіцієнти, що залежать від конструкції фрези, матеріалів різальних елементів та оброблюваної заготовки;

– сили різання [3]:

$$P_{x,y,z} = C_p \cdot t^{X_p} \cdot S_z^{Y_p} \cdot V^{Z_p},$$

де C_p, X_p, Y_p, Z_p – коефіцієнти;

– середня товщина зрізу:

$$a_{cp} = S_z \cdot \sin \frac{\psi}{2} = S_z \sqrt{\frac{B}{D}}.$$

В роботі [4] наведена така залежність шорсткості при торцевому фрезеруванні:

$$R_z \text{ розр} = \frac{S_z^2}{8r} \left(1 - \frac{x^2}{R^2} \right),$$

де r – радіус при вершині ножа; x – відстань зсуву площини, в якій вимірюється шорсткість; R – радіус фрези.

Товщину зрізу визначають за формулою:

$$a = S_z \cdot \sin \varphi \cdot \sin \psi_i,$$

де S_z – подача на зуб; φ – кут в плані; ψ_i – миттєвий кут.

Як свідчить багаторічний досвід наукової і практичної діяльності, визначені теоретично режими різання (і особливо подача на зуб або на оберт торцевої фрези) часто корегуються на робочому місці в зв'язку з виникаючими негативними факторами:

- неможливістю отримання необхідної шорсткості поверхні;
- нерівномірністю зношування ножів;
- необхідністю повного виведення фрези з оброблюваної поверхні через торцеве биття і виникаючими на поверхні слідами від затирання обробленої поверхні ножами.

Відомо [7, 8, 9], що для фінішної обробки плоских поверхонь значного поширення отримали торцеві фрези з регульованими ножами, оснащеними надтвердим матеріалом (НТМ). Для чистової обробки використовують фрези, оснащені пластинками з радіусною різальною кромкою без заточування або з заточуванням кожного ножа окремо. Геометричні похибки виготовлення і регулювання таких фрез включають:

- похибки діаметрального розташування гнізд під ножі відносно осі корпусу фрези;
- похибки базової поверхні кожного ножа і гнізд під них;
- похибки кутового розташування гнізд під ножі;
- похибки заточки ножів;
- похибки базової поверхні для монтажу фрези (отвір або конус);
- похибки регулювання однакового вильоту всіх ножів;
- похибки закріплення фрези на шпинделі верстата;
- похибки, пов'язані з торцевим і радіальним биттям шпинделя верстата.

Крім того, на процес торцевого фрезерування впливають відхилення від теоретичних параметрів верстата і пристрою для базування і закріплення заготовки, а саме:

- відхилення від перпендикулярності осі шпинделя до траєкторії переміщення стола верстата у поздовжньому і поперечному напрямках;
- нерівномірність обертання шпинделя;
- нерівномірність подач стола;
- жорсткісні характеристики верстатів тощо.

Всі наведені відхилення положення вершин формоутворюючих елементів від теоретичного суттєво впливають на розрахунок значення визначального параметра при торцевому фрезеруванні – товщину шару металу, що видаляється кожним з лез багатолезового інструмента.

В роботі [4] виконано математичне моделювання геометричних параметрів фрези косокутного різання зі ступінчастим розташуванням ножів на логарифмічній спіралі за фактичними вимірами положення ножів. Проте не проаналізовано вплив місцерозташування кожного ножа відносно осі обертання фрези на процес чистового торцевого фрезерування.

Викладення основного матеріалу. З наведеного вище аналізу випливає, що кожний ніж фрези видаляє різні частки припуску, а окремі з них взагалі можуть не брати участі в обробці до моменту зношення інших, що неодноразово підтверджувалось спостереженнями за процесом зношування кожного з лез. Можливо, з огляду на це явище пояснюється намагання багатьох дослідників процесу обробки плоских поверхонь використовувати торцеві фрези з одним ножом [5, 6].

Крім того, для чистової обробки поверхонь застосовуються торцеві фрези з зачисним (чистовим) зубом, який розташований на меншій відстані, ніж інші, від осі обертання фрези, але з більшим за інші вильотом.

В інших дослідженнях, таких як [7], використано принцип перерозподілу подач між різальними елементами торцевої фрези. Розташовуючи попарно чистові і чорнові різці (під різними кутами на одній відстані від осі обертання фрези), забезпечивши таким чином більшу товщину зрізу чорновим різцем порівняно з чистовим, досягають стійкості інструмента в $1,5 \div 2,0$ рази вищу, ніж при рівномірному їх розташуванні.

Слід зазначити, що неможливо виготовити торцеву фрезу без певних похибок взаємного розташування ножів, а також повністю усунути радіальне і торцеве биття шпинделя фрезерного верстата, на якому закріплюється інструмент. Особливого значення точність положення формоутворюючих елементів багатолезового торцевого інструмента набуває при високошвидкісному фінішному фрезеруванні плоских поверхонь деталей. В роботі [8] наведені рекомендації з призначення режимів швидкісної обробки (чорнкової, напівчистової, фінішної і суперфінішної), в тому числі подачі на зуб від 0,01 до 0,1 мм. Тобто подача на зуб сумірна з похибкою взаємного розташування ножів. Це суттєво впливає на розрахункову подачу на зуб. Найбільш наближеною до розрахункової є подача на оберт фрези, яка забезпечена кінематикою верстата.

Зважаючи на наведене, є доцільним визначити, які з похибок виготовлення інструмента і верстата з закріпленою на ньому торцевою фрезою найбільш впливові на зміну подачі на зуб порівняно з розрахунковою.

Розглянемо схему розташування формоутворюючих елементів на фрезі і траєкторії їх рухів при теоретичному (номінальному) положенні і з врахуванням похибок (рис. 1).

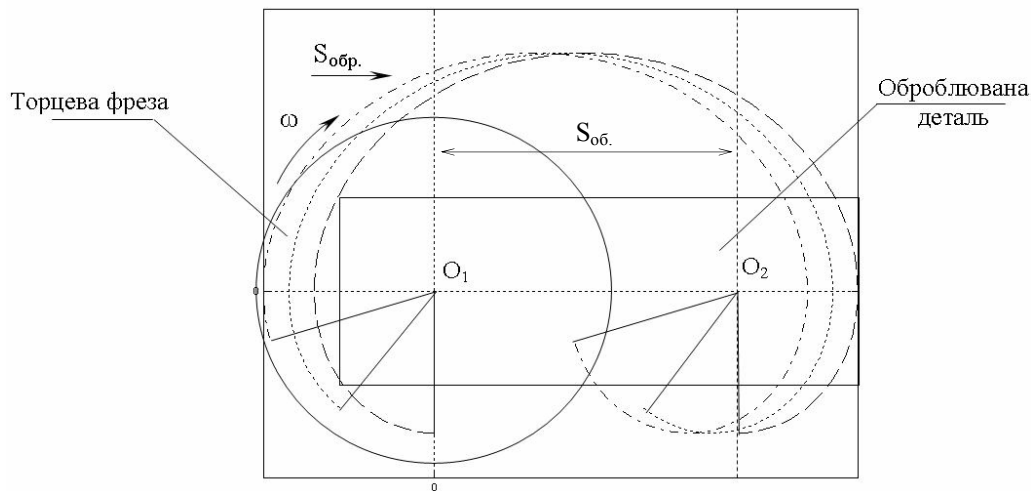


Рис. 1. Траєкторії руху вершин ножів торцевої фрези

Похибка радіального розташування ножів (відстань від осі обертання фрези) складається з наступних елементів:

$$\Delta R = f(\Delta r, \Delta d_3, \Delta d_{ун}, \Delta_n, e_{\kappa.\delta\kappa}, e_{\kappa.\delta\eta}),$$

де Δr – похибка радіуса розташування отворів (гнізд) під закріплення ножів, мм; Δd_3 – похибка закріплення корпусу фрези на шпинделі, мм; $\Delta d_{ун}$ – радіальне биття шпинделя, мм; Δ_n – похибка ножа (різниця у відстані вершини ножа від його базової поверхні); $e_{\kappa.\delta\kappa}$ і $e_{\kappa.\delta\eta}$ – зміщення вершини ножа через торцеве биття шпинделя і неперпендикулярність отворів під ножі до базової поверхні корпусу відповідно.

Мінімально досяжні значення величини похибок з врахуванням можливостей сучасного обладнання у загальному машинобудуванні наведені на рис. 2.

Виготовлення отворів в корпусі торцевої фрези під ножі здійснюються, як правило, на координатно-розточувальних верстатах високої точності з базуванням на торець і отвір, що служить центруючим при встановленні фрези на шпинделі верстата.

Згідно з кресленням $\Delta r = \pm 0,01$ мм, а Δd_3 складається з похибки виготовлення центруючої поверхні шпинделя верстата $d_{ун} = 128,57_{-0,02}$ і діаметра центруючого отвору у корпусі фрези $d_{\kappa} = 128,57^{+0,04}$.

$$\text{Максимальне зміщення осі } e_{\delta,\kappa} = \frac{\Delta d_{ун} + \Delta d_{\kappa}}{2}.$$

З умовою врахування допустимого радіального биття шпинделя

$$e_{\delta,\kappa} = \frac{\Delta d_{ун} + \Delta d_{\kappa}}{2} + \delta_p = \frac{0,02 + 0,04}{2} + 0,006 = 0,036 \text{ мм.}$$

Сумарна подача на зуб теоретично враховує (алгебраїчно підсумовує) неточності установки ножів фрези відносно осі обертання шпинделя, а також взаємного їх кутового розташування.

Похибка кутового розташування викликає зміну товщини зрізу, яка дорівнює:

$$\pm \Delta a_{zp} = \frac{S}{360^\circ} (\pm \Delta \varphi) = \pm 0,003 S \Delta \varphi,$$

де $\pm \Delta a_{zp}$ – зміна товщини стружки, що видаляється одним ножом, мм; S – подача на оберт фрези, мм/об; $\pm \Delta \varphi$ – похибка кутового розташування ножа (відхилення від теоретичного рівномірного розташування), град.

З метою визначення комплексного впливу конструктивних і геометричних параметрів розташування вершин різальних елементів фрези відносно осі обертання шпинделя, а також з врахуванням деформацій в процесі обробки системи «корпус фрези – шпиндель» пропонується проведення аналізу теоретичної моделі компоновки торцевої фрези, встановленої на шпинделі верстата з ЧПК мод. ГФ2171С6 середнього типорозміру з вертикальною віссю шпинделя.

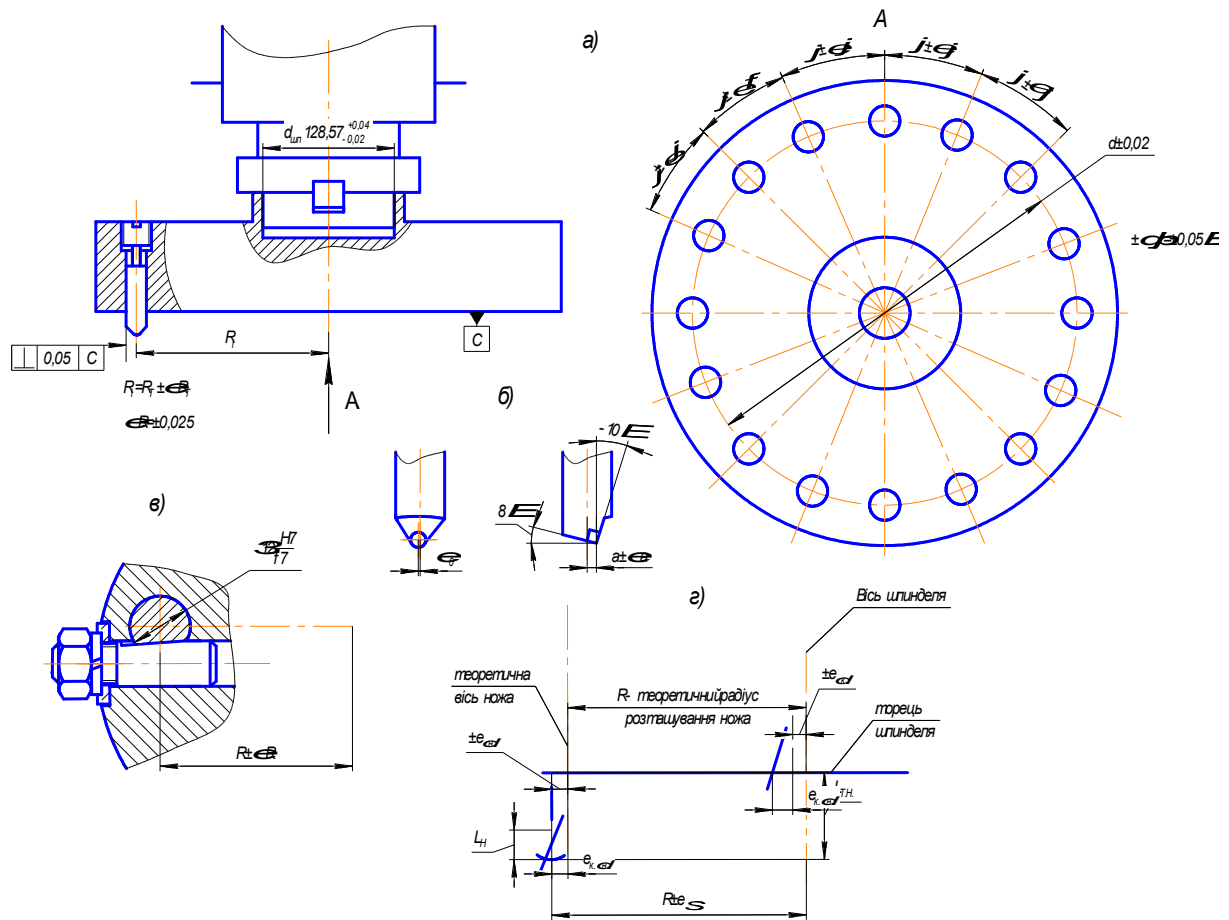


Рис. 2. Схема утворення відхилення вершини різального елемента відносно його теоретичного положення: а – закріплення фрези на шпинделі; б – різальний елемент; в – закріплення різального елемента; г – схема похибок розташування вершини різального елемента; $e_{\delta,к}$ – паралельне зміщення осі корпуса фрези відносно осі шпинделя; $e_{к,δ,к}$ – перекіс або зміщення осі від торцевого биття шпинделя; $e_{\delta,н}$ – паралельне зміщення ножа в отворі корпуса фрези відносно теоретичного положення; $e_{к,δ,н}$ – перекіс або зміщення вершини ножа через неперпендикулярність осі отвору під закріплення ножа до торця базування корпуса на шпинделі; e_{Σ} – сумарна похибка вершини ножа відносно її теоретичного положення; $L_{т,н}$ – відстань від торця шпинделя до вершини ножа

Під дією сил різання через пружні деформації системи відбувається зміщення вершини ножа відносно його вихідного положення після встановлення фрези на шпинделі верстата. Позначимо позначками δ_{xi} , δ_{yi} , δ_{zi} ці зміщення. Також позначимо кути повороту фрези через дію сил різання α_i , θ_i і γ_i навколо таких саме осей X_i , Y_i і Z_i .

Тоді відносний приріст радіуса-вектора вершини ножа $\bar{\Delta R}$ запишеться наступним чином [10]:

$$\bar{\Delta R} = \begin{pmatrix} \delta_{xi} + \theta_i Z - \gamma_i Y \\ \delta_{yi} + \gamma_i Z - \alpha_i X \\ \delta_{zi} + \alpha_i Y - \theta_i X \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Нормальна до осі шпинделя похибка положення вершини ножа Δn у системі координат X_n , Y_n і Z_n буде дорівнювати:

$$\Delta n = (\theta_i \cos \varphi - \alpha_i \sin \varphi) \sum_{i=1}^n + \sum \delta_{xi} \cos \varphi + \sum \delta_{yi} \sin \varphi. \quad (2)$$

За джерело похибок θ_i і α_i приймемо силу різання P_x , що розташована в площині X_i з $\varphi = 0$.

Джерелами похибок δ_{xi} , δ_{yi} є відхилення розмірів і форм поверхонь, що з'єднуються.

Позначимо у рівнянні (2):

$$\delta_{xi} \cos \varphi \longleftrightarrow \bar{e}, \quad \sum \bar{e} = \bar{e}_\Sigma,$$

$$\text{тоді } \Delta n = (\overline{\Delta r \bar{n}}) = e_\Sigma + \theta_i \sum_{i=1}^n l_i, \quad (3)$$

де l_i – виліт i -го елемента фрези.

Величина e_Σ первинного відхилення вершини ножа від номінального (теоретичного) геометричного місця точок після збирання фрези і її монтажу на шпинделі верстата пов'язана з відповідними складовими ланками e_i (рис. 2) рівнянням [10]:

$$e_\Sigma = \frac{1}{k_\Sigma} \sqrt{\sum_{i=1}^n (A_i k_i e_i)^2}, \quad (4)$$

де A_i – передаточне відношення i -ої ланки; k_i – коефіцієнт відносного розсіювання i -ої ланки; e_i – перекус або паралельне зміщення осі, мм; k_Σ – коефіцієнт відносного розсіювання величини замикаючої ланки e_Σ .

$$A_i = \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{l_{Hi}}, \quad (5)$$

де l_{Hi} – виліт, на якому нормується величина перекоосу у i -му з'єднанні.

Деформації системи, що складається з корпусу фрези, встановленого на торці шпинделя верстата, самого шпинделя, вильоту ножа і механізму його закріплення у корпусі, можуть бути визначені як деформації консольних ділянок з дотриманням принципу незалежності переміщень і контактних деформацій у циліндричних і торцевих стиках за формулою:

$$\delta_\sigma = \sum_i^n \left[\frac{P \left(\sum_i^n l_i \right)^3}{3EI_i} + \theta_i \sum_i^n e_i \right], \quad (6)$$

де P – навантажуюча сила, Н; E – модуль пружності, МПа; I_i – осьовий момент опору перерізу i -го елемента, мм⁴; θ_i – кут повороту у i -му стикі, мкм/мм.

Для верстата мод. ГФ2171С6:

– радіальне биття шпинделя $\delta_p = 0,006$ мм;

– торцеве биття шпинделя $\delta_T = 0,01$ мм.

Максимальне значення зміщення вершини ножа через торцеве биття шпинделя δ_T :

$$e_{\kappa.\delta.\kappa} = \frac{\delta_T \cdot 2}{d_{ун}} \cdot L_{T.n} = \frac{0,010 \cdot 2}{128,57} \cdot 80 = 0,012 \text{ мм},$$

де $L_{ин}$ – відстань від вершини інструмента до площини торця шпинделя.

Ряд виконаних досліджень щодо базування і закріплення ножів у корпусі фрез визначив високу стабільність їх багаторазової установки у циліндричних з'єднаннях при односторонньому притисканні клиновими елементами.

$$e_{\delta.n} = \pm \Delta r \pm \frac{T_{u.овв.} + T_u}{2}, \quad (7)$$

де $T_{u.овв.}$ – поле допуску на виготовлення отворів у корпусі фрези; T_u – нижнє відхилення поля опуску діаметра ножа.

У нашому випадку максимальне значення зміщення:

$$e_{\delta.n} = 0,01 + \frac{0,018 + 0,034}{2} = 0,036 \text{ мм}.$$

Додаткове значення зміщення вершини ножа через неперпендикулярність осі отворів під закріплення ножів до базового торця корпусу фрези на вильоті L_n :

$$l_{\kappa.\delta.n} = \frac{\Delta \perp}{L} \cdot L_n,$$

де $\Delta \perp$ на довжині L задано у кресленні корпуса фрези і знаходиться у межах 0,01 мм на довжині 50 мм.

$$e_{\kappa, \delta, n} = \frac{0,01}{50} \cdot 15 = 0,003 \text{ мм.}$$

Середні зазори у циліндричних з'єднаннях, які вибираються в одну сторону, розраховуються за формулою [10]:

$$\Delta = \frac{1}{4} k_i (\delta_A + \delta_B), \quad (8)$$

де k_i – коефіцієнт розсіювання допуску при виготовленні деталей шліфуванням ($k_i = 1,09$); δ_A і δ_B – поля допусків отворів і вала відповідно.

Для корпуса фрези і шпинделя:

$$\Delta d = \frac{1}{4} 1,09 (0,04 + 0,02) = 0,016 \text{ мм.}$$

Для ножа і отвору у корпусі фрези:

$$\Delta h = \frac{1}{4} 1,09 (0,018 + 0,034) = 0,014 \text{ мм.}$$

Результати отриманих розрахунків показали, що деформаційне зміщення вершини ножів (6) через незначні сили різання (складова P_x) на порядок менше, ніж зміщення, утворюване через геометричні похибки виготовлення всіх елементів системи, у тому числі величини похибки зміщення вершини ножа Δh відносно осі його стрижня у радіальному напрямку.

Загальне максимальне зміщення положення вершини ножа складається з двох значних похибок: паралельного і кутового зміщення відносно осі шпинделя [10]:

$$\bar{e}_{\Sigma(x)} = \frac{1}{k_{\Sigma(x)}} \sqrt{\bar{e}_{cp}^2 \sum_i^n A_i^2 k_i^2}, \quad (9)$$

де \bar{e}_{cp} – половина середнього допуску на ланки розмірного ланцюга.

З метою отримання оптимальної інформації щодо зміщення вершини кожного з ножів багатолезового інструмента (торцевої фрези) коефіцієнт відносного розсіювання розподілення замикаючої ланки k_{Σ} приймали рівним одиниці тому, що кількість складових ланок з однорідними за величиною допусками серед загальної кількості ланок – більше п'яти. Це значення k_{Σ} відповідає 0,27 % виходу замикаючої ланки за допустимі межі.

Підставивши наведені вище значення, отримаємо:

$$e_{\Sigma(x)} = \pm 0,037 \text{ мм.}$$

Висновки. В роботі [9] наведені зразки торцевих багатолезових фрез з регульованими положеннями різальних вставок, оснащених НТМ. Точнісні параметри розташування вершин ножів:

- радіальне биття 0,03...0,05 мм;
- торцеве биття 0,005...0,015 мм.

Згідно з ТУ2-035-918-83 «Фрези торцеві насадні ступінчасті зі вставними ножами, оснащеними композитом, регульовані»:

- радіальне биття 0,08 мм;
- торцеве биття 0,007 мм.

Ці ж джерела рекомендують для чистових проходів приймати подачу на зуб в межах 0,01...0,04 мм при обробці сталей і чавунів. Тобто подача на зуб фрези може бути значно меншою, ніж похибки взаємного розташування всіх ножів, що підтверджує причину відсутності різання окремими елементами та їх нерівномірного зношування.

Також значно збільшується імовірність отримання нерівномірного процесу різання, незважаючи на те, що дотримується рекомендоване співвідношення $B/D = 0,7...0,8$.

На наш погляд, є декілька шляхів зменшення впливу похибок взаємного розташування формоутворюючих елементів на процес обробки, а саме:

- застосовуючи ножі з радіусною формою різальних кромок, значно збільшити рекомендовану подачу (у 2–3 рази);
- використовувати торцеві ступінчасті фрези зі спіральним розташуванням ножів.

В подальших дослідженнях передбачається проведення комплексу експериментальних робіт з наступним узагальненням і визначенням кореляційних коефіцієнтів для введення у загальноприйнятні аналітичні формули обчислення швидкості і сил різання, утворюваної шорсткості поверхні, фактичної подачі на зуб та інше.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Армарего И.Дж.А., Браун Р.Х.* Обработка металлов резанием: Пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1997. – 325 с.
2. *Вульф А.М.* Резание металлов. – Л.: Машиностроение, 1973. – 496 с.
3. Технологические особенности механической обработки инструментом из поликристаллических сверхтвёрдых материалов / Под редакцией Карюка Г.Г. – К.: Наук. думка, 1991. – 288 с.
4. *Струтинський В.Б., Мельничук П.П.* Математичне моделювання металорізальних верстатів: Монографія. – Житомир: ЖІТІ, 2002. – 570 с.
5. *Виговський Г.М.* Підвищення працездатності торцевих фрез для чистової обробки плоских поверхонь: Автореф. дис...к.т.н. – К.: НТУУ “КПІ”, 2000. – 16 с.
6. *Громовий О.А.* Розробка чистових косокутних торцевих фрез з комбінованими схемами різання: Автореф. дис...к.т.н.: 05.03.01. – К., 2002. – 16 с.
7. *Прошин Г.А., Симоненко Ю.П.* Эксплуатационные особенности инструментов, работающих по принципу перераспределения подачи между режущими элементами // Республиканский межведомственный научно-технический сборник. Технология и автоматизация машиностроения. – Вып. 28. – К.: Техника, 1981. – С 55–59.
8. Конструкции и эксплуатация торцевых фрез из сверхтвёрдых материалов на основе нитрида бора: Методические рекомендации. – М.: НИИИ по машиностроению, 1984. – 66 с.
9. *Лецинер Я.А., Свиринский Р.М., Ильин В.В.* Лезвийные инструменты из сверхтвёрдых материалов. – К.: Техника, 1981. – 120 с.
10. *Дунаев П.Ф., Леликов О.П.* Расчёт допусков размеров. – М.: Машиностроение, 1980. – 208 с.

МЕЛЬНИЧУК Петро Петрович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технології машинобудування і конструювання технічних систем, ректор Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

– технологія машинобудування.

ЛОЄВ Володимир Юхимович – кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування і конструювання технічних систем Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

– технологія машинобудування;

– комплексні і комбіновані методи обробки плоских поверхонь деталей машин;

– конструювання металообробних верстатів та інструментів.

ГОЛОВАТЕНКО Олег Володимирович – аспірант кафедри технології машинобудування і конструювання технічних систем Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

– обробка плоских переривчастих поверхонь.

Подано 19.02.2007