

Г.М. Виговський, к.т.н., доц.  
Р.О. Окішев, аспір.

Житомирський інженерно-технологічний інститут

**ВИЗНАЧЕННЯ ПЛОЩІ ПЕРЕРІЗУ ЗРІЗУ ПРИ ФРЕЗУВАННІ ПЕРЕРИВЧАСТИХ ПОВЕРХОНЬ ТОРЦЕВИМИ ФРЕЗАМИ**

*Запропонована методика визначення площі перерізу зрізу при фрезуванні плоских і переривчастих поверхонь різальними елементами, що оснащені циліндричними різальними вставками.*

Недостатнє вивчення кінематичних та динамічних явищ, що виникають під час торцевого фрезування переривчастих поверхонь, не дозволяє прогнозувати чи робити порівняльний аналіз зміни площі перерізу зрізу для конкретних умов обробки на стадії проектування інструменту. Визначення кількості різальних елементів торцевої фрези, що одночасно беруть участь в процесі фрезування переривчастих поверхонь, в роботі [1], дало змогу перейти до вирішення питань знаходження площі перерізу зрізу.

Перетин зрізу та його орієнтацію в просторі з урахуванням особливостей обробки переривчастих поверхонь можна визначити подвійним інтегруванням

$$S_{xoz} = \iint_D (x, z) dx dz \quad (1)$$

Траекторію руху заготовки та торцевої фрези можна представити у вигляді сукупності переміщень та поворотів відносно вибраної системи координат. В залежності від часової функції це дасть змогу віднайти необхідний переріз зрізу при переривчастому фрезуванні (рис. 1).

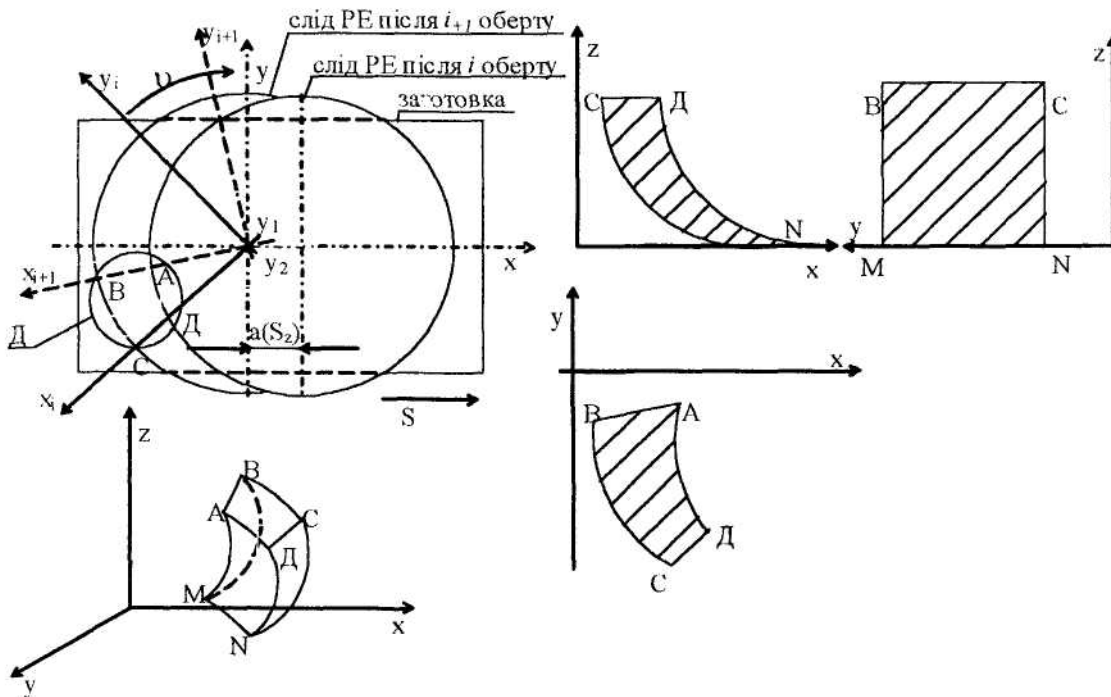


Рис. 1. Схема визначення товщини зрізаного шару

Виділяємо деякий елементарний переріз зрізу (область Д). Дану область Д обмежуємо додатковою системою координат  $x_i y_i$  та  $x_{i+1} y_{i+1}$ , що розміщується в залежності від кута повороту різального елемента торцевої фрези. Задавшись рівняннями (2), можна описати будь-яке положення додаткової системи координат:

$$y_1 = k_1 x + b; y_2 = k_2 x + b . \tag{2}$$

Для отримання системи рівнянь (2) розглянемо рис. 2.

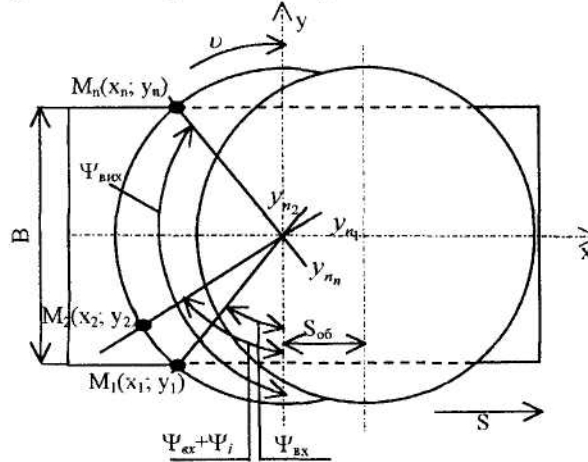


Рис. 2. Схема визначення кута входу різального елемента в зону різання і виходу із зони різання

Нам відомо, що в будь-який момент повороту різального інструмента відносно заготовки, що поступально рухається, торцева фреза буде характеризуватися кутом входу різального елемента в заготовку ( $\psi_{ox}$ ) в точці  $M_1$  з координатами  $(x_1; y_1)$ , та кутом виходу ( $\psi_{oux}$ ) в точці  $M_n$  з координатами  $(x_n; y_n)$ . Тоді рівняння прямих, які проходять через точки  $M_1(x_1; y_1)$ ,  $M_2(x_2; y_2)$  і які утворюють з віссю  $OX$  відповідно кути  $(\psi_{ox})$ ;  $(\psi_{ox} + \psi_i)$ , і будуть шуканими, де  $(\psi_i)$  – прийнятий крок розрахунку ( $1^\circ$ ).

Кут входу різального елемента в зону різання і кут виходу знаходяться таким чином:

$$\cos \psi_{ox} = \frac{B}{2r}; \quad \cos \psi_{oux} = -\cos \psi_{ox}; \quad \psi_{oux} - \psi_{ox} = \frac{\pi}{90} \arcsin \frac{B}{2r},$$

де  $B$  – ширина фрезування, мм;

$r$  – радіус торцевої фрези, мм.

Коли відомі кут входу та всі проміжні кути контакту різального елемента із заготовкою до кута виходу, ми можемо отримати значення кутового коефіцієнта  $k$ :

$$k = \operatorname{tg} \psi_{ox} . \tag{3}$$

У загальному випадку значення кутового коефіцієнта від  $\psi_{ox}$  до  $\psi_{oux}$  знаходяться таким чином:

$$(k_1 = \operatorname{tg} \psi_{ox}; k_2 = \operatorname{tg} (\psi_{ox} + \psi_i); \dots; k_n = \operatorname{tg} \psi_{oux}) . \tag{4}$$

А коли відома координата точки  $M_1(x_1; y_1)$  та  $k_1$ , знайдемо рівняння прямої (1):

$$y_n - y_1 = k_1(x_n - x_1) \Rightarrow y_n = k_1 x_n + b_1 , \tag{5}$$

де  $b_1 = y_1 - k_1 x_1$ .

Відповідним чином отримаємо рівняння прямої (2):

$$y_{n_2} - y_2 = k_2(x_{n_2} - x_2) \Rightarrow y_{n_2} = k_2 x_{n_2} + b_2 , \tag{6}$$

де  $b_2 = y_2 - k_2 x_2$ .

У загальному випадку рівняння прямої знаходиться таким чином:

$$y_{n_n} - y_n = k_n(x_{n_n} - x_n) \Rightarrow y_{n_n} = k_n x_{n_n} + b_n , \tag{7}$$

де  $b_n = y_n - k_n x_n$ .

Визначимо площу проекції перерізу зрізу  $S_{xoz}$  за виразом (1) на вході у заготовку (рис. 3). Вирішення даної задачі дасть можливість визначити площу перерізу зрізу на вході до пазу чи на виході з пазу заготовки. Для чого визначимо  $S_{xoz}$  за трьома положеннями додаткової системи координат  $x_i y_i$ .

Тоді площа проекції перерізу зрізу  $S_{xoz}$  знаходиться наступним чином.

Відомо, що рівняння кола має вигляд:

$$x^2 + z^2 = R^2 . \tag{8}$$

Рівняння кола, що зміщено відносно першого кола на величину  $a$  в декартовій системі координат знаходиться таким чином (9):

$$z^2 + (x-a)^2 - R^2 = 0. \tag{9}$$

Спростимо вираз (9):

$$z^2 + (x-a)^2 - R^2 = 0 \Rightarrow z^2 + x^2 - 2ax + a^2 = R^2. \tag{10}$$

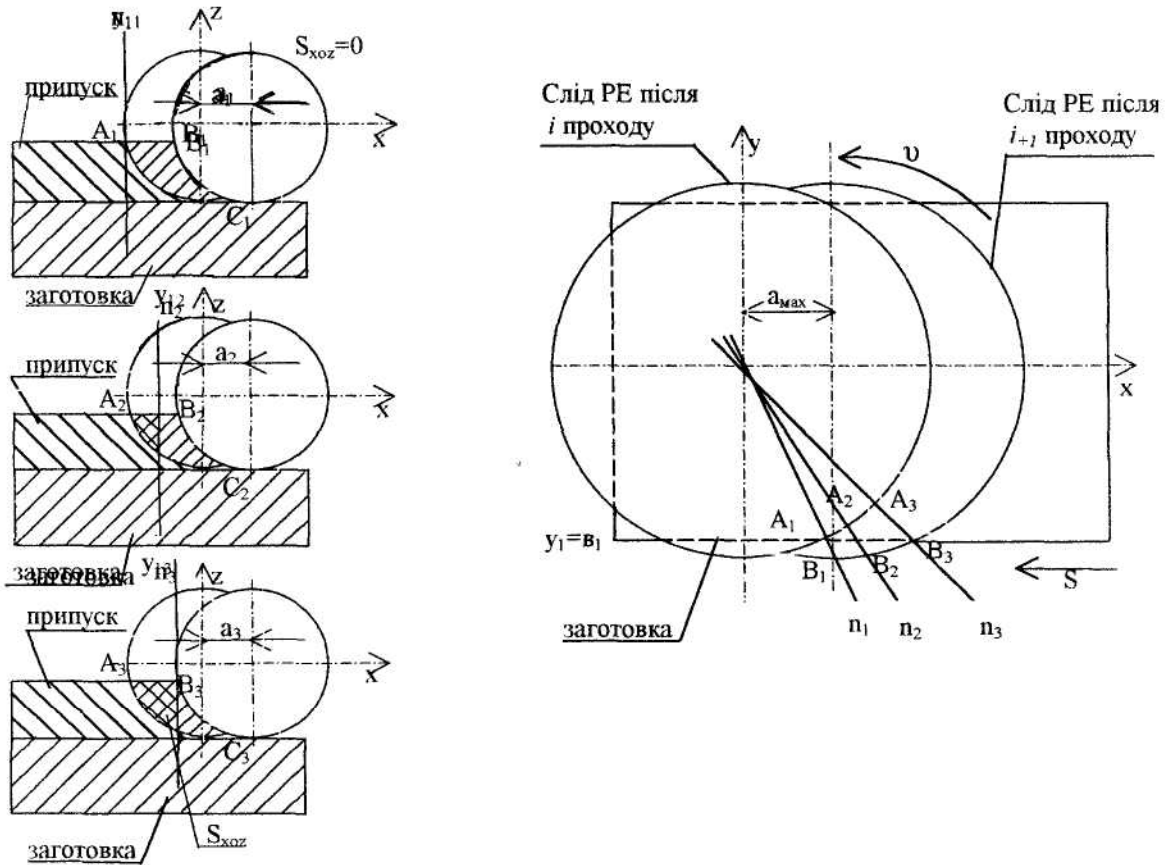


Рис. 3. Схема зміни площі поперечного перерізу зрізу на вході в заготовку

Зміна знака  $\pm a$  відбувається в залежності від обраної системи координат. Для того, щоб знайти площу виділеного об'єкта з декартової системи координат, перейдемо в полярну. Вказуємо на необхідний взаємозв'язок між цими двома координатними системами стосовно поставленої нами задачі:

$$S_{xoz} = \iint_D dx dz = \iint_D \rho d\rho d\psi, \tag{11}$$

де  $x = \rho \cos t, z = \rho \sin t, R = \rho. \tag{12}$

Тоді рівняння кіл, які ми визначили відносно декартової системи координат, в полярній системі будуть описуватися наступними залежностями:

$$x^2 + z^2 - R^2 = 0 \Rightarrow (\rho \cos t)^2 + (\rho \sin t)^2 - \rho^2 = 0; \tag{13}$$

$$z^2 + x^2 - 2ax + a^2 - R^2 = 0 \Rightarrow \rho^2 - 2a\rho \cos \psi + a^2 - R^2 = 0, \tag{14}$$

де  $z^2 + x^2 = \rho^2.$

Вираз (14) можна спростити:

$$\rho^2 - 2a\rho \cos \psi + a^2 = R^2 \Rightarrow (\rho - a \cos \psi)^2 = R^2 - a^2 - a^2 \cos^2 \psi \Rightarrow \rho = \pm \sqrt{R^2 - a^2 \sin^2 \psi} - a \cos \psi. \tag{15}$$

Для даної задачі площа перерізу зрізу  $S_{xoz}$  у відповідності до схеми розрахунку (рис. 4) прийме вигляд:

$$S_{xoz} = S_1 + S_2 \Rightarrow S = \int_{\psi_1}^{\psi_2} d\psi \int_{\rho_1}^{\rho_2} \rho d\rho + \int_{\psi_2}^{\psi_3} d\psi \int_{\rho_1}^{\rho_2} \rho d\rho, \text{ мм}^2. \quad (16)$$

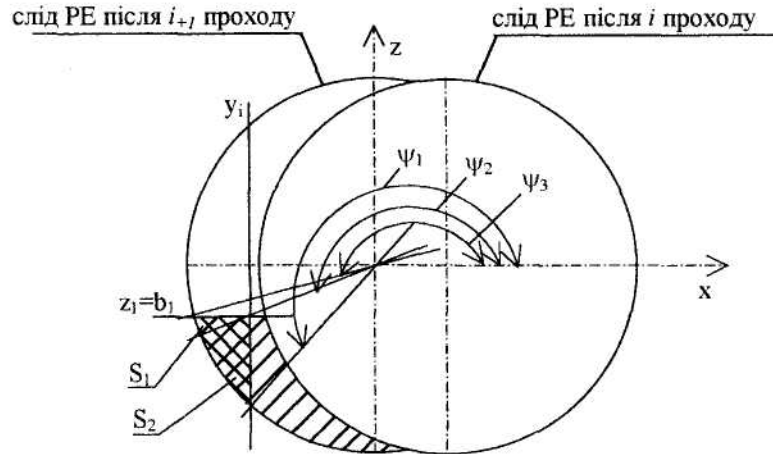


Рис. 4. Схема визначення площі перерізу зрізу

Тоді складові  $S_1$  приймуть такий вигляд (17):

$$\psi_2 = \arctg \frac{z_2}{x_2}, \quad z_2 = \rho \sin \psi_2, \quad x_2 = \rho \cos \psi_2; \quad \psi_3 = \arctg \frac{z_3}{x_3}, \quad x_3 = \rho \cos \psi_3, \quad z_3 = \rho \sin \psi_3, \quad (17)$$

$$\rho_1 = \frac{b_1}{\sin \psi_3},$$

де нижня межа інтегрування визначається наступним чином:

$$z_1 = b_1 \Rightarrow \rho_1 \sin \psi_3 = b_1 \Rightarrow \rho_1 = \frac{b_1}{\sin \psi_3}.$$

Складові  $S_2$  будуть мати такий вигляд (18):

$$\psi_2 = \arctg \frac{z_2}{x_2}, \quad z_2 = \rho \sin \psi_2, \quad x_2 = \rho \cos \psi_2; \quad \psi_1 = \arctg \frac{z_1}{x_1}, \quad x_1 = \rho \cos \psi_1, \quad z_1 = \rho \sin \psi_1, \quad (18)$$

$$\rho_1 = \frac{b_0}{\cos \psi_1},$$

де нижня межа інтегрування визначається наступним чином:

$$x_0 = b_0 \Rightarrow \rho_1 \cos \psi_1 = b_0 \Rightarrow \rho_1 = \frac{b_0}{\cos \psi_1}.$$

Вираз (15) дозволяє визначити верхню межу інтегрування ( $\rho_2$ ), причому зміна знака ( $\pm$ ) відбувається в залежності від четверті у системі координат, в якій знаходиться різальний елемент.

На основі аналітичного методу визначення площі перерізу зрізу для переривчастих поверхонь отримані графіки залежності зміни площі перерізу зрізу від режимних параметрів і форми оброблюваної поверхні заготовки.

Розглянемо рис. 5, а та рис. 5, б, де криві отримані при роботі однозубим лезовим інструментом ( $D = 200$  мм) на таких режимах:  $n = 1200$  хв<sup>-1</sup>;  $S_{об} = 0,2$  мм/об;  $t = 1$  мм.

Криві графіків (рис. 5, а; рис. 5, б) відповідно характеризують зміну величини площі перерізу зрізу при обробці поверхні з двома пазами та одним вікном. На рис. 5, а спостерігається розрив кривої у двох місцях:  $t_1 = 70 \cdot 10^{-4}$ , с –  $t_2 = 84 \cdot 10^{-4}$ , с;  $t_3 = 168 \cdot 10^{-4}$ , с –  $t_4 = 182 \cdot 10^{-4}$ , с, що відповідає знаходженню протягом  $14 \cdot 10^{-4}$  секунд різального елемента над перериваннями. При цьому довжини розривів кривої відповідають величинам ширини пазів, а сама траєкторія кривої є схожою до траєкторії руху РІ над заготовкою.

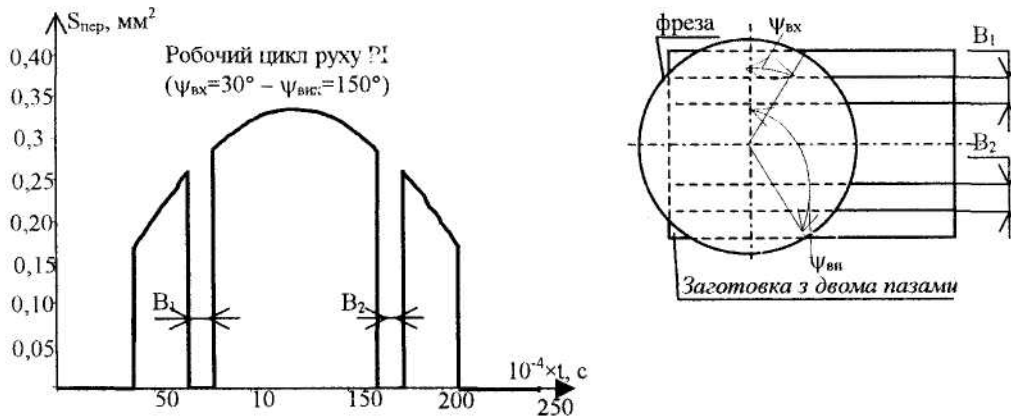


Рис. 5, а. Схема зміни величини площі перерізу зрізу при відносно сталому різанні за один оберт PI

На рис. 5, б розрив кривої спостерігається при:  $t_5 = 98 \cdot 10^{-4}$ , с –  $t_2 = 154 \cdot 10^{-4}$ , с, що відповідає знаходженню протягом  $56 \cdot 10^{-4}$  секунд різального елемента над вікном.

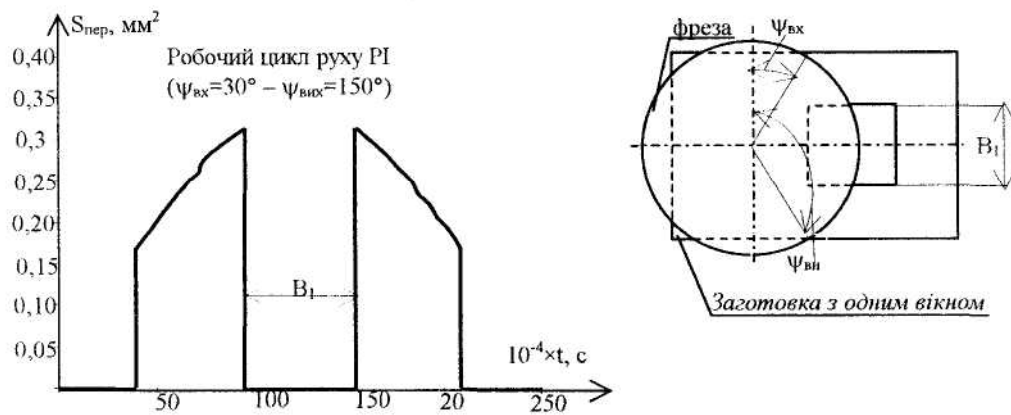


Рис. 5, б. Схема зміни величини площі перерізу зрізу при відносно сталому різанні за один оберт PI

При цьому довжина розриву кривої відповідає величині ширини вікна, а сама траєкторія кривої є схожою до траєкторії руху PI над заготовкою. Тому саме форма оброблюваної поверхні заготовки є важливим чинником, який впливає на змінну величини площі перерізу, а значить і на складові сили різання.

На рис. 6 отримані криві при роботі ступінчастою торцевою фрезою ( $z = 20$ ;  $m \times n = 5 \times 4$ ) де  $m$  – кількість спіралей, що розташовуються на різальному інструменті;  $n$  – кількість ступіней в кожній спіралі. Задалися режимними параметрами для чорнового (а) та чистового фрезування (б):

- а)  $n = 1200$  хв<sup>-1</sup>;  $S_{об} = 1$  мм/об;  $t_г = 4$  мм; б)  $n = 1200$  хв<sup>-1</sup>;  $S_{об} = 0,25$  мм/об;  $t_г = 0,8$  мм.

Якщо при роботі однозубим лезовим інструментом на рис. 5, а; рис. 5, б спостерігається значний стрибок значень площ перерізу зрізу, що викликаний наявністю на оброблюваній поверхні заготовки переривань, то при роботі багатолезовим інструментом із кількістю різальних інструментів, що беруть одночасно участь у процесі різання ( $m > 1$ ), ці перепади дещо згладжуються внаслідок перекриття різальних елементів, що вийшли із зони різання, різальними елементами, що на даний момент виконують процес обробки (рис. 6).

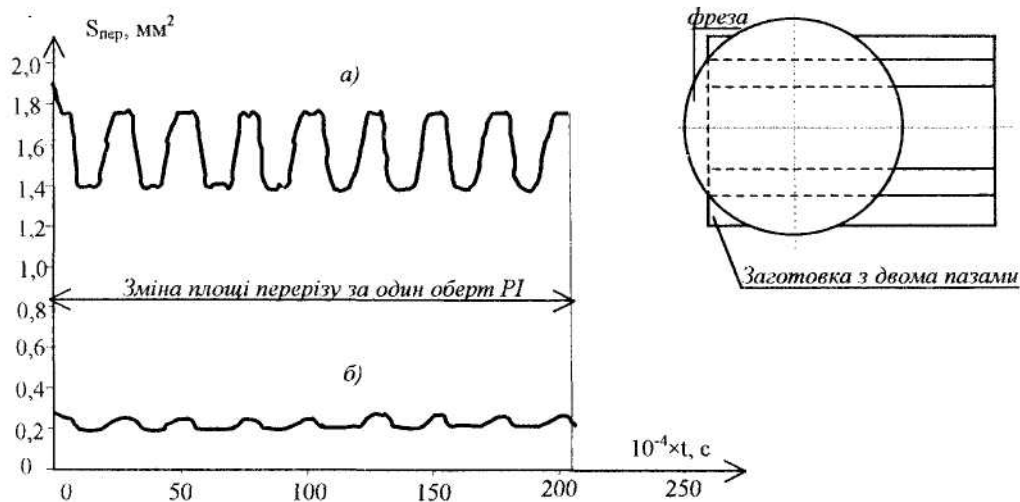


Рис. 6. Схема зміни величини площі перерізу зрізу при відносно сталому різанні за один оберт багатолезового інструмента

Крива *a* отримана для умов чорнового фрезування, крива *б* отримана для умов чистової обробки. Хвилястість отриманих кривих для обох випадків вказує на постійну зміну кількості *m* в зоні різання. Так, для заданих умов обробки вершини кривих відповідають максимально можливій кількості *m* в зоні різання (*z* = 6). Величина впадини відповідає мінімально можливій кількості різальних елементів, що беруть участь у процесі фрезування (*z* = 5). Незначне коливання кількості *m* в зоні різання пояснюється незначною шириною пазів по відношенню до значення кута між сусідніми різальними елементами (*ν* = 18°). В іншому випадку спостерігалися більш значні перепади між вершиною та впадиною кривої.

Для умов чистового торцевого фрезування спостерігається менша величина коливань *S<sub>пер</sub>* у порівнянні з умовами чорнової обробки, що свідчить про необхідність роботи з меншими значеннями *t<sub>p</sub>*; *S<sub>об</sub>* для отримання оптимальної шорсткості поверхні різання. Таким чином, за результатами даної роботи можна зробити наступні висновки, що зміна значень величини площі перерізу зрізу залежить від:

1. Глибини різання та подачі, збільшення яких призводить до зростання площі перерізу зрізу, а значить і складових сили різання.
2. Форми різальної частини інструмента.
3. Форми оброблюваної поверхні тощо.

Вирішення задачі знаходження площі поперечного перерізу зрізу для переривчастих поверхонь дозволить проводити аналітичні розрахунки головної складової сили різання при використанні в якості різальних елементів – надтвердих матеріалів, оскільки форма одиничного імпульсу тангенційної складової сили різання в значній мірі співпадає з формою площі перерізу зрізу по дузі контакту. Скористаємося аналітичним виразом, що наведений в роботі [6]:

$$P_z = 0,185 \cdot HV \cdot a_1 \cdot b \cdot (0,8 \cdot k_a + 2,28) + C_1 \cdot HV \cdot l_\alpha \cdot b, \tag{19}$$

де *HV* – твердість оброблюваного матеріалу за Вікерсом;

*a<sub>1</sub>*; *b* – відповідно товщина та ширина перерізу зрізу;

*k<sub>a</sub>* – коефіцієнт потовщення стружки, (*K<sub>1</sub>* = *f*(*k<sub>a</sub>*));

*C<sub>1</sub>* – для сталі 40X (HRC 50) складає 0,09, для сталі 40X (HB 200) – 0,06, для сірого чавуну СЧ 20 (HB 190) – 0,05;

*l<sub>α</sub>* – довжина контакту на задній поверхні (*l<sub>α</sub>* = 0,06 – 0,08).

Так, нами розраховувались та визначались аналітичним шляхом головна складова сили різання *P<sub>z</sub>* при обробці загартованої сталі 40X (HRC 50) торцевою фрезою, оснащеною РЕ із НТМ (*z* = 24 (4×6), *t<sub>z</sub>* = 1, *S<sub>об</sub>* = 1, *n* = 30 с<sup>-1</sup>, *λ* = 0). Схема оброблюваної заготовки представлена на рис. 6.

Тоді сумарна миттєва колова сила для *m* різальних елементів, що одночасно беруть участь у процесі різання ступінчастими фрезами, з урахуванням виразу (19) прийме наступний вигляд:

$$\sum_1^m P_z = \sum_1^m P_{l_i} \sin \psi_i + \sum_1^m F_{z_i} = \tau_B \sum_1^m S_{неп} \cdot K_1 + \tau_A \cdot \sum_1^m l_u \cdot t,$$

де  $\tau_B$  – дотичні напруження, МПа;

$\tau_A$  – напруження розтягу, МПа.

Для максимальної кількості різальних елементів  $m$  для даної схеми різання ( $m = 7$ ) головна складова сили різання  $\sum_1^m P_{z_{\max}} = 872 \text{ Н}$ .

Порівняння результатів даного розрахунку з іншими джерелами [2, 3, 6] показало гарне співпадання величин миттєвих колових сил.

Таким чином, запропонований нами метод визначення площі перерізу для обробки плоских та переривчастих поверхонь лезовим інструментом із ПНТМ з використанням циліндричних різальних вставок дозволить з високою точністю визначити площу перерізу зрізу в будь-якому місці заготовки при визначених режимах фрезування. Отримані дані дають можливість впливати на динамічні характеристики процесу торцевого фрезування, шляхом корегування їх з урахуванням зміни геометрії та форми заготовки, орієнтації та розташування різального інструмента та заготовки, геометричних та конструктивних параметрів торцевих фрез, геометрії різальних елементів та їх кількості і т. д.

В подальших дослідженнях буде виконано наступне.

На основі запропонованої в роботі [1] методики визначення кількості різальних елементів, що одночасно беруть участь у різанні та створеної методики визначення площі перерізу зрізу, планується визначити:

1. Значення всіх складових сили різання.
2. Вплив схем різання на динамічні параметри процесу обробки переривчастих поверхонь;
3. Основні вимоги, яким повинен відповідати інструмент для мінімізації динамічних коливань, що виникають під час фрезування переривчастих поверхонь.
4. Створення відповідної конструкції різального інструмента.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. *Виговський Г.М., Окішев Р.О.* Моделювання процесу обробки переривчастих поверхонь торцевими фрезами // Вісник ЖІТІ.– 2002. – № 3 (22) / Технічні науки. – С. 28–37.
2. *Розенберг А.М., Розенберг О.А.* Механика пластического деформирования в процессах резания и деформирующего протягивания.– Киев: Наук. думка, 1990. – 320 с.
3. *Виговський Г.М., Мельничук П.П.* Розрахунок сил різання при обробці деталей ступінчастими торцевими фрезами косокутного різання // Вісник ЖІТІ.– 1990. – № 11 / Технічні науки. – С. 56–66.
4. *Грановский Г.И., Грановский В.Г.* Резание металлов. – М.: Высшая школа, 1985.
5. *Мальгин В.И., Шестаков К.Л.* Система управления процессом механической обработки на основе обобщающей математической модели динамических процессов при резании // Вестник Машиностроения.– 1998. – № 8. – С. 22–28.
6. *Карюк Г.Г.* Технические особенности механической обработки РИ из СТМ. – Киев: Наук. думка, 1991. – 283 с.

**ВИГОВСЬКИЙ** Георгій Миколайович – кандидат технічних наук, доцент, проректор з організаційно-навчальної роботи Житомирського інженерно-технологічного інституту.

Наукові інтереси:

– дослідження у галузі обробки металів різанням.

**ОКІШЕВ** Руслан Олександрович – аспірант кафедри ТМіКТС Житомирського інженерно-технологічного інституту.

Наукові інтереси:

– використання надтвердих матеріалів у машинобудівній галузі;

– дослідження питань обробки переривчастих поверхонь торцевим фрезуванням.