

ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ У МАШИНОБУДУВАННІ

УДК 621.914.2

Г.М. Виговський, к.т.н., доц.

Р.О. Окішев, аспір.

Житомирський інженерно-технологічний інститут

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ОБРОБКИ ПЕРЕРИВЧАСТИХ ПОВЕРХОНЬ
ТОРЦЕВИМИ ФРЕЗАМИ

Запропонована методика визначення кількості різальних елементів, які одночасно беруть участь у процесі торцевого фрезування переривчастих поверхонь. Представлені результати моделювання динаміки торцевого фрезування.

Аналіз конструкцій деталей, що випускаються заводами загального машинобудування, показав, що деталі з переривчастою поверхнею складають 15–17 % від загальної кількості деталей. Причому кількість переривань коливається від одної до двадцяти [1, 2]. Характерною особливістю переривчастих поверхонь (рис. 1) є наявність пазів, вікон, отворів тощо, глибина яких перевищує загальний припуск на механічну обробку (переріз А-А).

Питання обробки переривчастих поверхонь торцевими фрезами вивчено недостатньо, що потребує виконання силового аналізу процесу різання. Адже наявність таких переривань є додатковим чинником, що зумовлює виникнення коливань більш високого рівня, ніж при обробці плоских поверхонь. Публікації [1–7] також стверджують відмінні кінематичні та динамічні характеристики процесу торцевого фрезування переривчастих поверхонь. Досягнення високої геометричної точності та якості оброблюваних деталей з переривчастою поверхнею значною мірою визначаються наявністю сил, що діють на технологічну систему. Виконаний у роботах [3, 4] теоретичний аналіз сил, що діють при торцевому фрезуванні, та їх експериментальне підтвердження для широкого спектра оброблюваних матеріалів дозволяють використати їх для теоретичного аналізу обробки переривчастих поверхонь. Значення складових сили різання знаходяться таким чином:

Сумарна миттєва колова сила для різальних елементів, що одночасно беруть участь у різанні [3, 4]:

$$\sum_1^m P_k = 0,28S_k \left[\sum_{i=1}^m S_z t_p K_2 \sin \psi_i + \sum_1^m l_p (\delta_o + \delta_i) \right]. \quad (1)$$

Сумарна миттєва сила подачі для різальних елементів, що беруть участь у різанні [3, 4]:

$$\sum_1^m P_s = 0,28S_k \sum_1^m \left\{ S_z t_p K_2 \left[\operatorname{tg}(\eta - \gamma) \sin(\varphi_b - \beta) \sin^2 \psi_i \pm 0,5 \sin 2\psi_i \right] + \right. \\ \left. + l_{p(i)} (\delta_o + \delta_i) \cdot \left(\frac{1}{f} \sin \varphi_{cep} \sin \psi_i \pm \cos \psi_i \right) \right\}. \quad (2)$$

Сумарна сила, паралельна осі фрези, для ступінчастих фрез [3, 4]:

$$\sum_1^m P_a = \sum_1^m P_1 \operatorname{tg}(\eta - \gamma) \cos(\varphi_b - \beta) \sin^2 \psi_i + \sum_1^m F_K \frac{1}{f} \cos \varphi_{cep} \sin \psi_i, \quad (3)$$

де S_k – фундаментальна механічна характеристика оброблюваного матеріалу;

S_z – подача на зуб фрези;

t_p – глибина різання;

K_2 – безрозмірний комплекс, що залежить від усадки стружки та переднього кута;

$\sin \varphi_i$ – синус кутів у плані;

l_p – загальна довжина всіх робочих ділянок різальних кромки РІ;

δ_o, δ_i – відповідно ширина стрічки контакту між задньою поверхнею інструмента, яка не має зносу, та поверхнею різання й ширина фаски зносу;

F_s – питома сила тертя на задній поверхні інструмента;

η, γ – відповідно кут тертя, передній кут;

f – коефіцієнт тертя.

Щоб отримати достовірні значення складових сили різання, необхідно створити надійну методику визначення кількості різальних елементів, що одночасно виконують обробку заготовки переривчастої форми. Нами запропонована така схема розрахунку:

1. Виконання математичного опису форми заготовки з поєднанням різних переривань (вікна, пази, отвори) в лінійному вигляді.

2. Визначення координат різальних елементів у визначений момент часу t при обертанні РІ з кутовою швидкістю ω .

3. Визначення кількості різальних елементів, що одночасно виконують обробку заготовки.

Якщо заготовка має переривання, то для подальшого визначення кількості різальних елементів, що одночасно виконують обробку заготовки, у лінійному вигляді нам достатньо проаналізувати саму поверхню різання. В даному випадку поверхня різання (рис. 1) характеризується ділянками сталого різання, що послідовно перериваються двома паралельними пазами. Відомо, що будь-яку поверхню чи площину можливо описати за допомогою системи математичних рівнянь. Для цього розташуємо зазначену поверхню різання в лінійній системі координат, де вісь абсцис є паралельною до одного з формоутворювальних рухів – подачі S та поверхні різання.

Згідно з рис. 1 зазначену поверхню можливо представити у вигляді прямих, де прямі $(K_0H_0; K_5H_5; K_0K_5; H_0H_5)$ окреслюють контур поверхні різання, а прямі $(K_1H_1- K_2H_2; K_3H_3- K_4H_4)$ – визначають ширину пазів.

Рівняння таких прямих представимо у вигляді:

$$Ax + By + C = 0. \tag{4}$$

де A, B – координати нормального вектора $N (A; B)$.

Якщо пряма не паралельна осі абсцис, рівняння прямої має вигляд :

$$y = kx + b. \tag{5}$$

Причому коефіцієнти при невідомих пропорційні між собою, а коефіцієнти вільних членів непропорційні, що є необхідною умовою паралельності вказаних прямих. Але, оскільки прямі $(K_0H_0; \dots; K_5H_5)$ паралельні осі абсцис, то кутовий коефіцієнт (k) дорівнює нулю, а це означає, що рівняння (5) приймає спрощений вигляд:

$$y = b. \tag{6}$$

Аналогічно отримаємо рівняння для прямих $(K_0K_5; H_0H_5)$ паралельних осі ординат:

$$x = b. \tag{7}$$

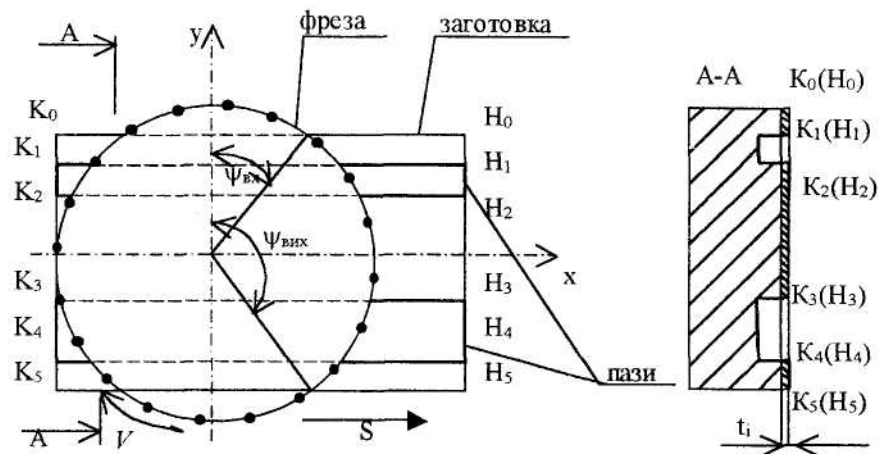


Рис. 1. Схема розташування торцевої фрези відносно заготовки з двома паралельними пазами

Можливо, що пази заготовки не будуть паралельні між собою (рис. 2, а), тоді рівняння прямої (K_3H_3) , що не є паралельною до решти прямих, задається виразом (5), для отримання якого скористаємося рівнянням прямої, яка проходить через дві точки $K_3(x_3; y_3); H_3 (x_3; y_3)$:

$$\frac{x - x_3}{x_3 - x_3} = \frac{y - y_3}{y_3 - y_3}. \tag{8}$$

В загальному випадку рівняння прямої з кутовим коефіцієнтом k можна визначити через рівняння прямої, що проходить через дві точки $K_n(x_n; y_n); H_n(x_n^l; y_n^l)$:

$$\frac{x - x_n}{x_n^l - x_n} = \frac{y - y_n}{y_n^l - y_n} \tag{9}$$

Якщо заготовка має в собі отвори (рис. 2, б), то можна їх описати за допомогою рівняння кола, що адаптоване до обраної системи координат:

$$R^2 = (x - a)^2 + (y - b)^2, \tag{10}$$

де R – відповідні радіуси отворів, мм;

x, y – координати отворів, мм;

a, b – величини зміщення осі отворів відносно обраної системи координат, мм.

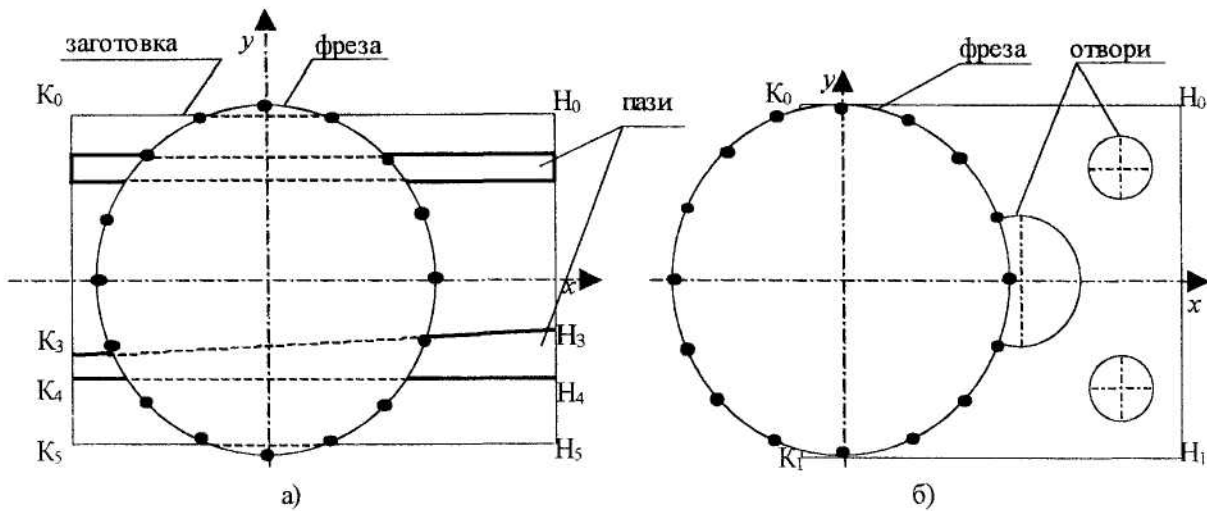


Рис. 2. а) схема розташування торцевої фрези відносно заготовки з двома неспівосними пазами;
 б) схема розташування торцевої фрези відносно заготовки з отворами

При поступовому русі заготовки вздовж напрямку осі обертання зі швидкістю v координати характерних точок прямих, що описують поверхню різання, в момент t будуть мати вигляд:

$$\begin{aligned} X_{K_0} &= X_{K_0} - vt_i \cos \alpha; Y_{K_0} = Y_{K_0} - vt_i \sin \alpha; \\ X_{H_0} &= X_{H_0} - vt_i \cos \alpha; Y_{H_0} = Y_{H_0} - vt_i \sin \alpha; \\ X_{K_n} &= X_{K_i} - vt_i \cos \alpha; Y_{K_n} = Y_i - vt_i \sin \alpha; \\ X_{H_n} &= X_{H_i} - vt_i \cos \alpha; Y_{H_n} = Y_{H_i} - vt_i \sin \alpha, \end{aligned} \tag{11}$$

Якщо $\alpha=0$, система рівнянь (5) має такий вигляд:

$$\begin{aligned} X_{K_0} &= X_{K_0} - vt_i; Y_{K_0} = Y_{K_0}; \\ X_{H_0} &= X_{H_0} - vt_i; Y_{H_0} = Y_{H_0}; \\ X_{K_n} &= X_{K_i} - vt_i; Y_{K_n} = Y_i; \\ X_{H_n} &= X_{H_i} - vt_i; Y_{H_n} = Y_i; \end{aligned} \tag{12}$$

Визначимо координати різальних елементів при обертанні різального інструмента з кутовою швидкістю ω у визначений момент часу t . Для цього розташуємо фрезу симетрично відносно обраної системи координат. Тоді координати будь-якої вершини леза різального елемента торцевої фрези відносно обраної системи координат в конкретний момент часу t при відповідній кутовій швидкості ω визначатимуться таким чином:

$$X_i(t) = R \cos(\omega t_i + \phi_i); Y_i(t) = R \sin(\omega t_i + \phi_i). \tag{13}$$

Ймовірність контакту вершини леза різального елемента з поверхнею різання та визначення кількості різальних елементів фрези, що одночасно беруть участь у процесі різання, здійснюється за такою методикою.

Відомо, що процес торцевого фрезування – це сукупність прямолінійного та обертового рухів відповідно заготовки та різального інструмента. Таким чином вершина леза різального елемента з плином часу буде змінювати своє положення відносно поверхні різання. За певний час t контакт найбільш віддаленого різального елемента відносно осі фрези з поверхнею різання відбудеться через

$$t = \frac{l_0}{S_{об} \cdot n}, \tag{14}$$

де l_0 – відстань між фрезою та заготовкою перед початком роботи, мм;

$S_{об}$ – подача на оберт, мм/об;

n – частота обертання, c^{-1} .

Таким чином, координати вершини леза різального елемента, що першим вступив в процес різання, відомі: $z_1 = (R; 0)$, де R – радіус зазначеного різального елемента; $\varphi_1 = 90^\circ$ (рис. 3).

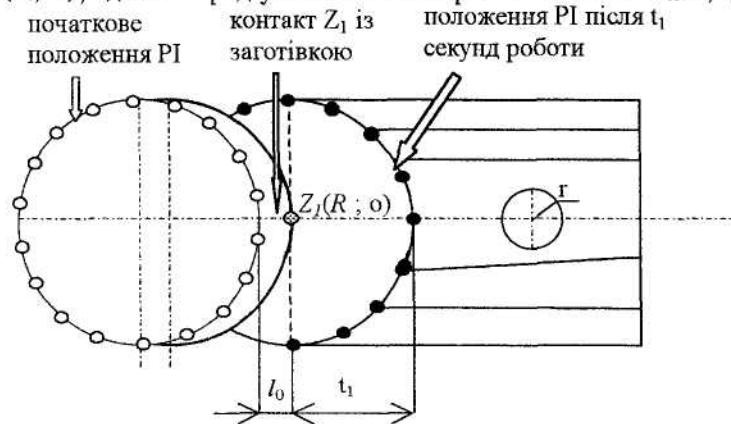


Рис. 3. Схема визначення контакту різальних елементів із поверхнею різання

Нехай необхідно визначити кількість різальних елементів після роботи протягом t_1 секунд роботи. За цей час фреза здійснить $n' = n \cdot t_1$ обертів. Припустимо, що $n = 20 \text{ c}^{-1}$; $t_1 = 5 \text{ с}$. Тоді фреза зробить 120 обертів. А, отже, різальний елемент, що першим вступив в процес різання, має відомі координати:

$Z_1 = (R; 0)$, де R – радіус зазначеного різального елемента; $\varphi_1 = 90^\circ$.

За умови, що $\frac{B}{D} = 1$, в різанні беруть участь лише різальні елементи, що знаходяться в ближчому відносно фрезувальної ділянки напівколі торцевої поверхні фрези. При обертанні інструмента кількість таких різальних елементів може змінюватись. Але, оскільки нам відомо положення різального елемента, що першим вступив у процес різання, відомо кути входу та виходу лез різальних елементів з контакту $\psi_{вх}$, $\psi_{вих}$ в межах яких в першій, четвертій чвертях вибраної системи координат розміщуємо решту різальних елементів.

За умови, що $\frac{B}{D} \leq 1$, кути входу та виходу лез різальних елементів з контакту $\psi_{вх}$, $\psi_{вих}$ визначаються таким чином:

$$\cos \psi_{ax} = \frac{b^2 + c^2 - a^2}{2bc}, \tag{15}$$

де $b = R$; $c = B/2$; $a = \sqrt{R^2 - \left(\frac{B}{D}\right)^2}$.

Отже, $\cos \psi_{max} = 180^\circ - \psi_{ax}$.

У випадку обробки поверхонь, що мають переривання (отвори, вікна, пази тощо) кількість різальних елементів, що одночасно беруть участь в процесі різання корегується таким чином.

Відома кількість m для плоскої поверхні, що має координати:

$$\begin{pmatrix} z_1(x_1; y_1) \\ z_2(x_2; y_2) \\ \dots \\ z_n(x_n; y_n) \end{pmatrix} \quad (16)$$

Перевіримо умову знаходження різальних елементів над перериваннями (рис. 3):

$$\begin{pmatrix} z_1(x_1; y_1) \\ z_2(x_2; y_2) \\ \dots \\ z_n(x_n; y_n) \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} b_2 < y_i < b_1 \\ r^2 > (x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 \\ b_4 < y_i < k_3 x_3 + b_3 \end{pmatrix} \quad (17)$$

При виконанні умови (18) лезо різального елемента бере участь в процесі різання.

$$\begin{pmatrix} z_n(x_n; y_n) \notin (b_1; b_2) \\ r^2 \leq (x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 \\ z_n(x_n; y_n) \notin (b_3; b_4) \end{pmatrix} \quad (18)$$

Після перевірки остаточно записуємо кількість різальних елементів, що одночасно беруть участь у процесі обробки переривчастої поверхні.

Для розрахунку кількості m розроблена програма на мові програмування Visual Fox Pro 5.0. Програма працює в режимі діалогу, дозволяє виконувати розрахунки кількості різальних елементів, що одночасно беруть участь у процесі обробки як плоских, так і переривчастих поверхонь заготовок. Результати розрахунків можуть бути виведені на екран монітора безпосередньо на роздрукуванні або збережені на диску у файлі, визначеному користувачем.

Запропонована така структура програми:

1. Запис вхідних даних:

1.1. Параметри різального інструмента:

- діаметр фрези D , мм;
- загальна кількість та координати різальних елементів: $R_i; u_i$.

1.2. Параметри оброблюваних заготовок:

- довжина та ширина заготовки: $H \times L$, мм;
- кількість та розміри переривань на поверхні різання (отвори, пази, вікна тощо).

1.3. Режимні параметри:

- швидкість обертання різального інструмента v , мм/с;
- подача на оберт $S_{об}$, мм/об.

1.4. Розрахункові залежності:

- частота обертання n , с⁻¹;
- кутова швидкість ω , рад/с;
- подача на різальний елемент S_z , мм/с;
- часовий крок розрахунку t , с.

2. Запис вихідних даних:

- таблиці та графіки зміни кількості різальних інструментів, що одночасно беруть участь у процесі різання залежно від часу обробки.

На рис. 4 запропоновані поверхні для розрахунку кількості m , що найчастіше зустрічаються при обробці деталей машин торцевим фрезуванням. Тоді згідно зі структурою програми як вихідні дані ми отримаємо таблиці та графіки зміни кількості різальних інструментів, що одночасно беруть участь у процесі різання залежно від часу обробки. Створена програма дозволяє визначити в будь-який момент часу кількість різальних елементів, що беруть участь в різанні чи, навпаки, знаходяться над перериваннями, а також дозволяє точно визначити координати різальних елементів та їх кути ψ (рис. 5).

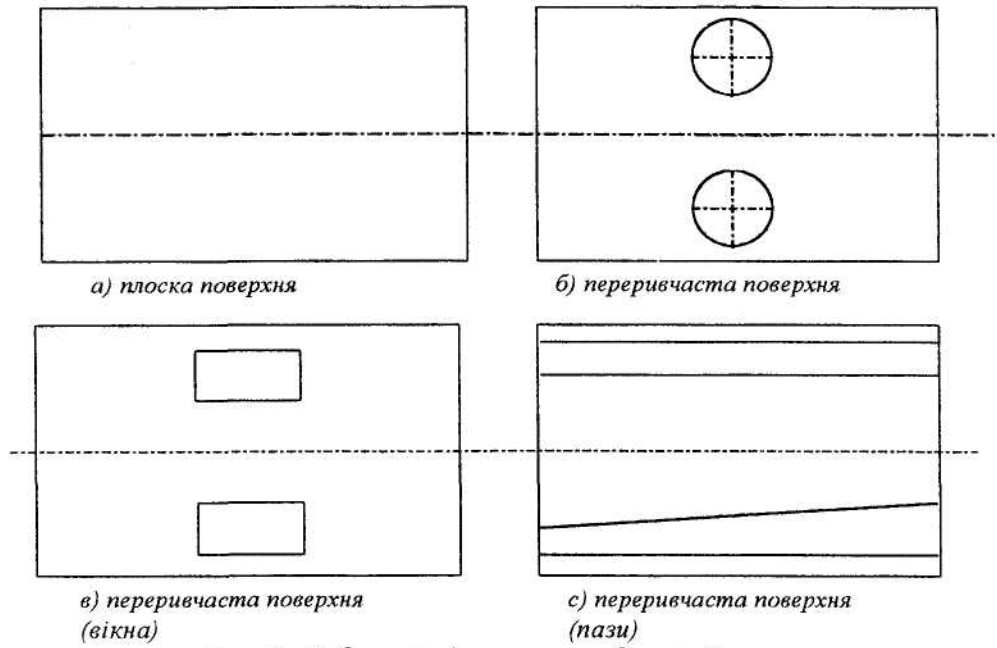


Рис. 4. Види зразків поверхонь деталей машин

Учёт РЭ (режущих элементов) в процессе резания

Время работы	РЭ над заготовкой	РЭ в зоне резания	РЭ над пререзанными	РЭ не режет по оси Z
38.5000000	12	10	2	0
39.0000000	12	10	2	0
39.5000000	12	9	3	0
40.0000000	13	10	3	0
40.5000000	12	10	2	0
41.0000000	12	9	3	0

Характеристики РЭ в зоне резания

Номер РЭ	Координаты РЭ по оси X	Координаты РЭ по оси Y	Угол РЭ
2	146.1129949	33.9262835	76.9280049
3	102.4375209	-109.5744237	36.9280049
9	80.4937043	-123.6002167	146.9261184
13	87.1215563	115.9087332	36.9299615
20	138.3255210	-41.4918673	106.9280750
25	117.3155535	76.4006604	56.9261885

Граф. представление

Закрыть

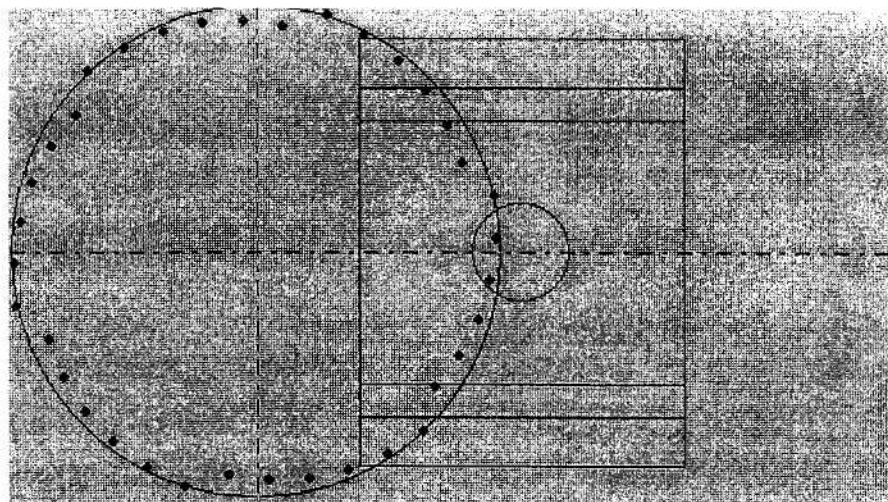
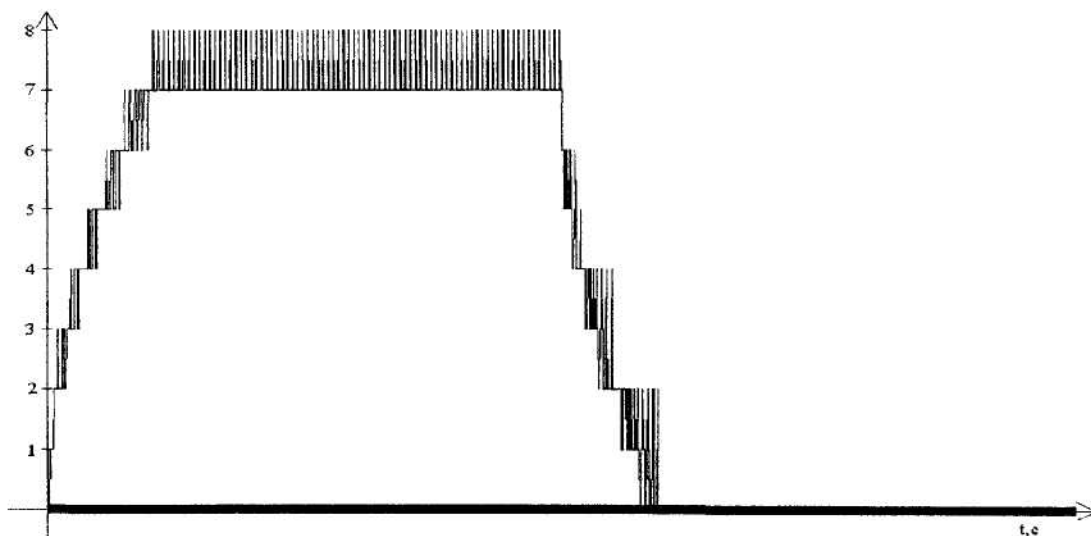
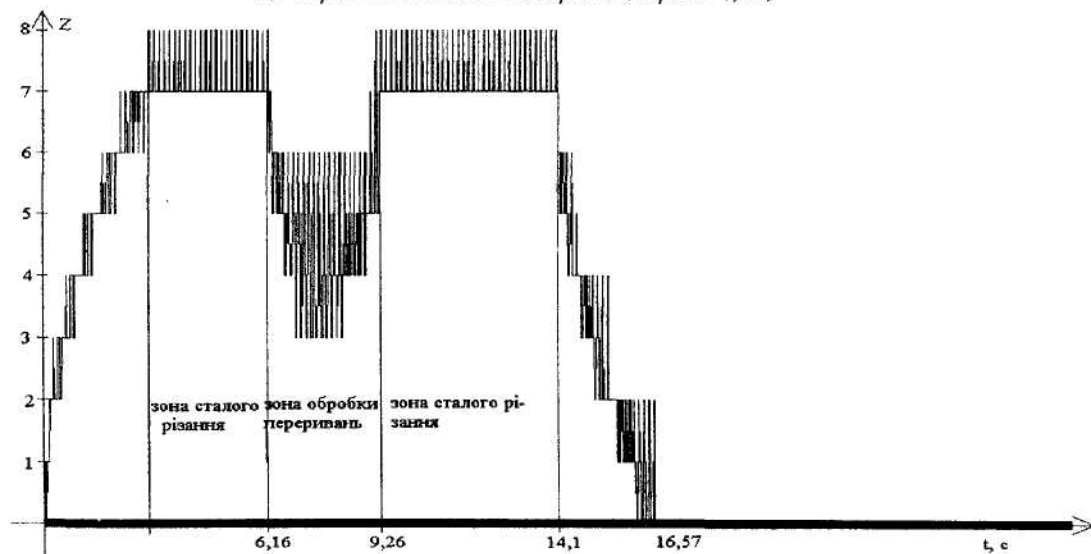


Рис. 5. Фрагмент визначення кількості t в зоні різання під час обробки переривчастої поверхні

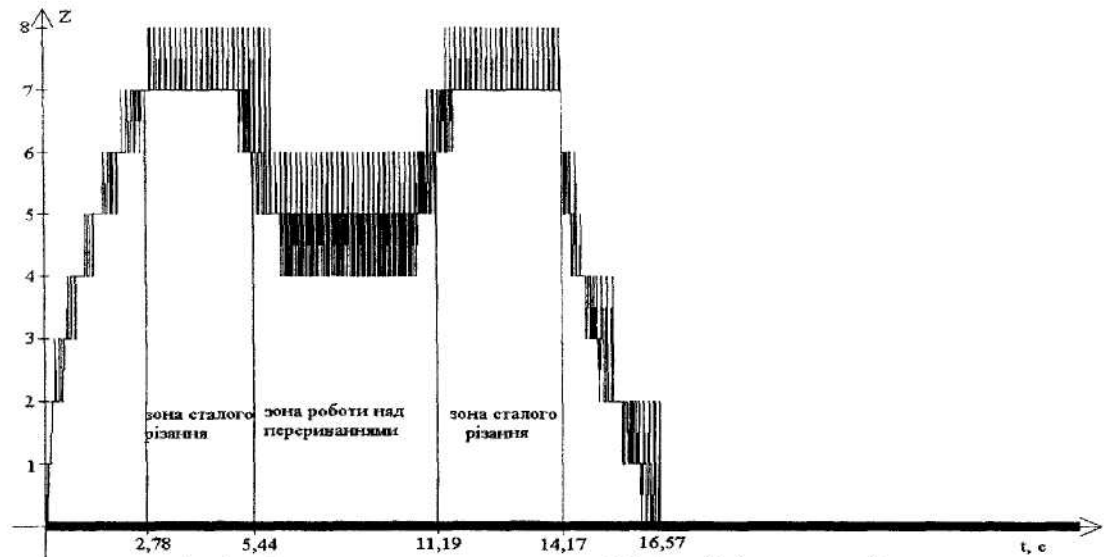
На рис. 6 представлені графіки зміни кількості різальних елементів фрези, що одночасно беруть участь у різанні за час обробки t в залежності від форми поверхні деталі. Під час врізання різального інструмента в заготовку до 2,78 секунд на всіх графіках, представлених на рис. 6, спостерігається зростання кількості m по експоненті до моменту відносно сталого різання, якщо в процесі різання забезпечується відносно стала кількість m . Коливання кількості різальних елементів, що одночасно беруть участь у різанні пов'язано з неможливістю практичного забезпечення одночасного входу – виходу різальних елементів торцевої фрези із зони різання внаслідок дії кінематичних і динамічних похибок, що виникають в процесі фрезування. Окрім того, відмінність графіка, що представлений на рис. 6, с, від решти графіків полягає в тому, що після роботи протягом 2,78 секунд різальні елементи фрези проходять над пазами, що суттєво корегує коливання кількості m в зоні різання. Для решти графіків процес різання відбувається в плоскій частині заготовки (рис. 4, а – рис. 4, в). Якщо для графіка рис. 6, а зона відносно сталого різання триває до моменту виходу одного із різальних елементів із зони обробки в напрямку паралельному до одного із формоутворюючих рухів – подачі S , то для графіків (рис. 6, б – рис. 6, в) відносна сталість кількості m порушується наявністю на оброблюваних поверхнях переривань. За час обробки протягом 5,44 секунд і до 11,19 секунд на рис. 6, в спостерігається помітне зменшення кількості m , що викликано проходженням різальних елементів над вікнами. На рис. 6, б також спостерігається помітне зменшення кількості m через 6,16 секунд і триває до 9,26 секунд, що викликано проходженням різальних елементів над отворами.



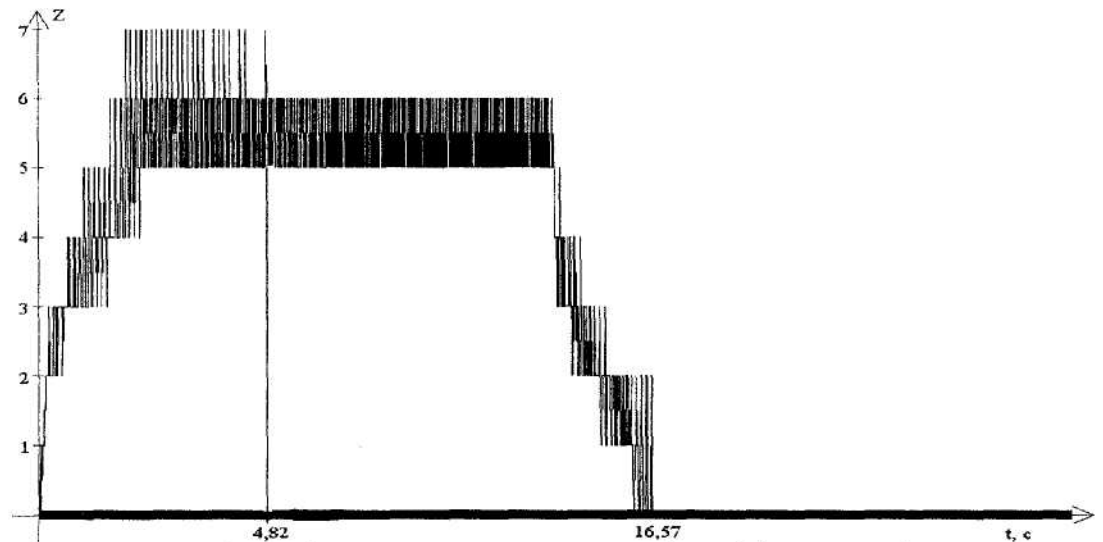
а) обробка плоскої поверхні (з рис. 4, а)



б) обробка переривчастої поверхні (отвори) (з рис. 4, б)



в) обробка переривчастої поверхні (вікна) (з рис. 4, в)



с) обробка переривчастої поверхні (пази) (з рис. 4, с)

Рис. 6. Графіки залежності кількості t від форми поверхні заготовки та часу обробки t

Ці ділянки характеризуються найбільшою величиною коливань кількості різальних елементів, що одночасно беруть участь у різанні. Це може спричинити значні динамічні та кінематичні коливання процесу різання, після чого кількість t помітно зростає. Різальні елементи ведуть обробку плоскої частини заготовки. Тому графіки зміни кількості t , що представлені на рис. 6, а – 6, в схожі. Після обробки протягом 14,1 секунди на рис. 6, а – 6, с спостерігається зменшення кількості t по експоненті, що викликано поступовим виходом різальних елементів із зони різання в напрямку, паралельному до одного з формуювальних рухів – подачі S .

Аналіз графіків доводить, що:

- 1) кількість різальних елементів, що одночасно беруть участь у процесі різання для плоских та переривчастих поверхонь суттєво різняться;
- 2) характер зміни кількості t залежить від кількості і виду переривань (пази, вікна, отвори);
- 3) характер зміни кількості t залежить від відношення ширини оброблюваної поверхні до діаметра фрези;
- 4) характер зміни кількості t залежить від схеми фрезювання;

5) суттєві коливання кількості різальних елементів, що одночасно беруть участь у процесі різання переривчастих поверхонь призводять до зростання коливань складових сили різання.

Графіки (рис. 6) отримані для часового кроку розрахунку – ($t = 0,1с$). Для більш точного визначення кількості різальних елементів торцевої фрези, що одночасно беруть участь у різанні з плином часу, необхідно, щоб часовий крок розрахунку дорівнював повороту інструмента на один градус. Запропонований метод визначення кількості різальних елементів, що одночасно виконують обробку заготовки, ефективний як для торцевого фрезування стандартними фрезами, так і ступінчастими; як для обробки плоских, так і переривчастих поверхонь.

В подальших дослідженнях буде виконано:

1. На основі запропонованої методики визначення кількості різальних елементів, що одночасно беруть участь у різанні, планується розрахувати сумарну площу перерізу зрізу для кожного окремого різального елемента, що знаходиться в зоні різання та фрези в цілому.

2. Визначення силових характеристик процесу торцевого фрезування переривчастих поверхонь.

3. Встановлення впливу схем різання на силові характеристики процесу торцевого фрезування.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Кудряшов Е.А.* Лезвийные сверхтвердые инструменты. Обработка прерывистых поверхностей. – Иркутск, 1987.

2. *Майзель П.А.* Повышение эффективности обработки прерывистых поверхностей резцами из гексанита-Р.: Дисс. к.т.н. – Ташкент, 1986.

3. *Розенберг А.М., Розенберг О.А.* Механика пластического деформирования в процессах резания и деформирующего протягивания. – Киев: Наук. Думка, 1990. – 320с.

4. *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.

5. *Куширинов П.В.* Повышение эффективности торцевого фрезерования широких плоских поверхностей путем увеличения жесткости элементов технологической системы.: Дисс. к.т.н. – Сумы, 1996.

6. *Андреев Г.С.* Работоспособность режущего инструмента при прерывистом резании // Вестник Машиностроения. – 1973. – №5. – С. 72–75.

7. *Горчаков Л.М.* Исследование динамических погрешностей обработки при прерывистом резании.: Автореферат дисс. к.т.н. – Киев, 1975. – 31с.

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.

Подано 10.06.2002