

Г.М. Виговський, П.П. Мельничук

ПРОЦЕС РІЗАННЯ ТОРЦЕВИМИ СТУПІНЧАТИМИ ФРЕЗАМИ З КОСОКУТНЬОЮ ГЕОМЕТРІЄЮ РІЗАЛЬНИХ ЧАСТИН, ЩО ОСНАЩЕНІ НАДТВЕРДИМИ МАТЕРІАЛАМИ (НТМ)

Викладено підхід до розрахунку параметрів процесу різання і складових сили різання при обробці деталей ступінчатими фрезами косокутньої геометрії.

Проектування високопродуктивного інструменту та дослідження процесу обробки є актуальною задачею, оскільки застосування прогресивного інструменту підвищує продуктивність і ефективність металообробки – що особливо важливо для верстатів з числовим програмним керуванням (ЧПК) і роботизованих виробничих комплексів, де велика вартість верстатохвиліни.

Велика кількість деталей мають плоскі поверхні, до яких підвищені вимоги відносно геометричної точності та шорсткості. Фінішна обробка плоских поверхонь виконується шліфуванням або чистовим торцевим фрезеруванням. Значні переваги має процес обробки таких деталей з застосуванням торцевого фрезерування. Це, насамперед, підвищена продуктивність (у 2...6 разів) відносно шліфування, високі експлуатаційні характеристики поверхневого шару (стискуючі остаточні напруги, відсутність мікроструктурних перетворень за рахунок низьких температур у зоні різання тощо).

В сучасних умовах широко використовуються торцеві фрези з різальними вставками із НТМ. НТМ мають специфічні фізико-механічні якості: твердість 40000...75000 МПа, теплостійкість 700...1300°C, теплопровідність 42...50 Вт/(м⁰ С), що дозволяє ефективно їх використовувати для процесів лезової обробки.

При використанні для різальних інструментів НТМ є необхідність вивчення особливостей процесу різання, оскільки відмінність їх фізико-механічних якостей від відомих матеріалів не дає можливості переносу рекомендацій по використанню традиційних матеріалів на процес різання інструментами із НТМ.

Аналіз конструкцій торцевих фрез показує, що при конструюванні чистових фрез не враховуються специфічні особливості чистової обробки – процесу різання з малими товщинами зрізу. При цьому для більшості конструкцій фрез зуби розміщені у радіальному напрямі на одній відстані від осі фрези, а в осьовому напрямку – в одній площині, що обмежує їх продуктивність. При експлуатації фрез стандартної конструкції є необхідність одержання точного взаємного розміщення різальних зубів. Тому биття різальних кромки зубів не повинно перевищувати для стандартних конструкцій 0,003...0,04 мм у залежності від діаметра фрези. Це досягається заточкою фрез у зборі, або фрези мають механізм регулювання осьового та радіального положення зубів.

Похибки положення приводять до того, що частка ріжучих зубів не бере участі у різанні або параметри зрізуваних шарів зубів неоднакові. Різна завантаженість ріжучих зубів є фактором, який знижує стійкість фрез та погіршує динаміку процесу фрезерування. При цьому оброблювана поверхня профілюється одним найбільш виступаючим зубом, що погіршує якість обробки та продуктивність обробки.

Перспективним уявляється проектування торцевих фрез із застосуванням ступінчатих схем різання. Як відомо, ступінчаті схеми різання використовуються в конструкціях чорнових торцевих фрез, що дозволяло фрезерувати деталі з підвищеними припусками на обробку. При цьому перевагою цих фрез є те, що за рахунок зменшення кількості ріжучих зубів у кожному ступінню збільшувалась кількість зубів, що реально беруть участь у роботі, а це, у свою чергу, підвищувало стійкість фрез.

Застосування ступінчатих схем різання для чистових торцевих фрез має дуже обмежений характер тому, що використання неоптимальної геометрії зубів, недостатня дослідженість процесу різання ступінчатими фрезами не забезпечують сприятливих умов для обробки і можливість суттєвого підвищення ефективності обробки.

Конструкція фрези залежить від великої кількості параметрів, що впливають на їх працездатність.

Як видно із рис. 1, конструювання фрез є багатопараметричною задачею і вибір того чи іншого конструктивного варіанту приймається конструктором без попередніх розрахунків і достатнього обґрунтування.

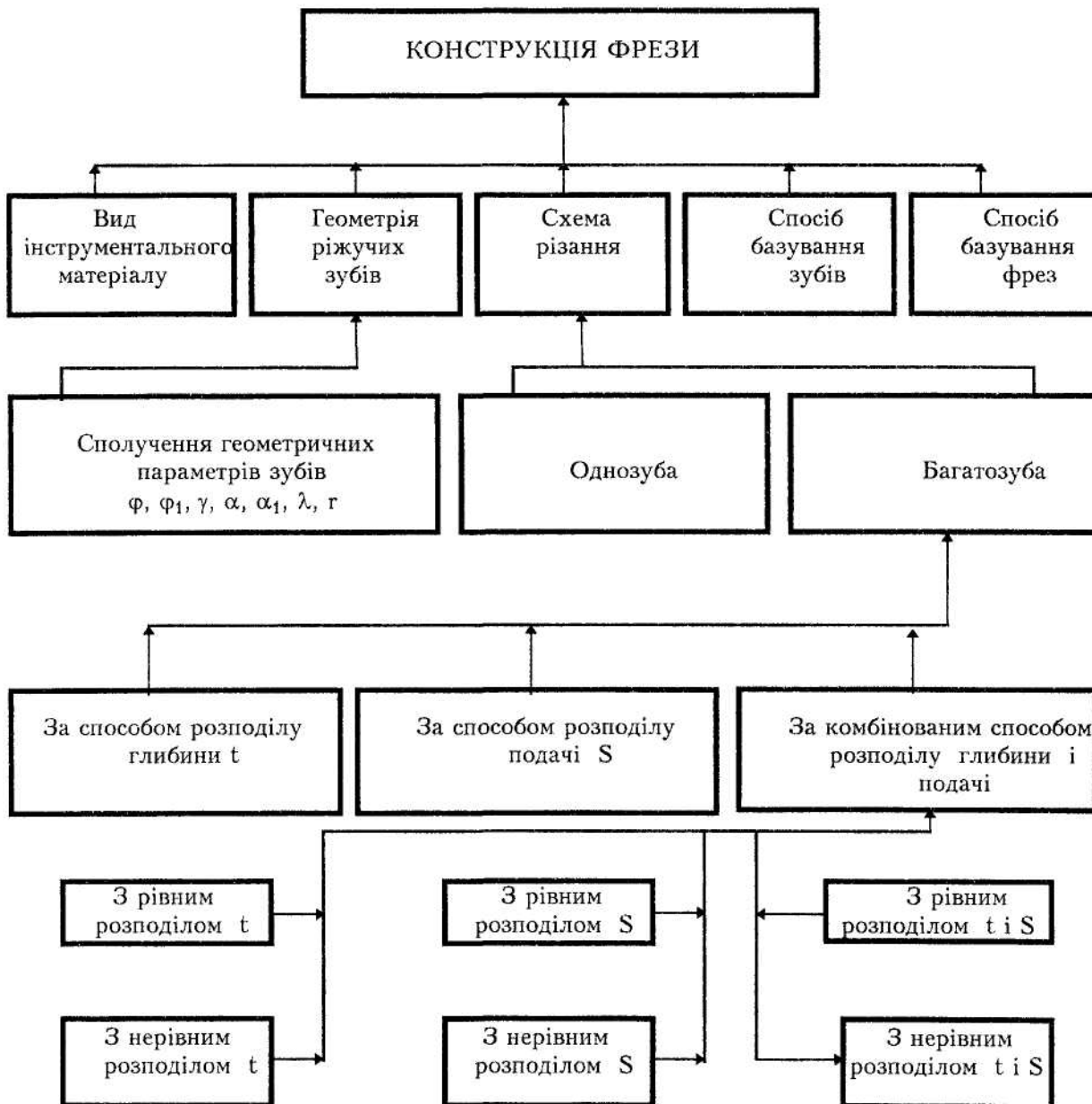


Рис. 1. Конструктивні параметри, що впливають на конструкцію фрези

В розробленій авторами гамі чистових торцевих фрез діаметром 100...500 мм реалізовані наступні конструктивні рішення:

- для вирівнювання навантаження між окремими ріжучими зубами використана ступінчата схема різання з розміщенням їх по логарифмічних спіралях (а. с. СССР №1036475);
- з метою створення ріжучих кромки зубів з рівним опором зношенню використана безвершинна геометрія;
- для можливості зрізання малих товщин зрізу, що близькі до радіуса округлення різальних кромки, застосована косокутня геометрія зубів.

Відмінність умов різання спроектованими фрезами вимагає вивчення динаміки процесу фрезерування для обґрунтування прийнятих рішень і оптимізації конструкцій фрез.

Авторами [1] розглянута динаміка процесу фрезерування при стандартній схемі різання торцевими фрезами, що є частковим випадком процесу фрезерування.

Використання ступінчатих схем різання сумісно з косокутною геометрією зубів суттєво впливає на характер процесу різання, тому авторами розглядаються питання розрахунків основних характеристик процесу різання.

Сили різання при торцевому фрезеруванні є змінними, що пояснюється переривчастим процесом різання кожним ріжучим елементом і змінністю товщини зрізу по дузі контакту зуба з поверхнею різання. Товщина зрізу стружки при даному миттєвому положенні зуба по дузі контакту [2] обчислюється за формулою:

$$a_p = S_z \sin \psi \sin \varphi, \tag{1}$$

де ψ – кут, що визначає миттєве положення ріжучої кромки зуба; φ – кут у плані головної ріжучої кромки; S_z – подача на зуб.

При роботі торцевої фрези виникають сили різання: колова P_o , що створює крутний момент на шпинделі верстата; сила подачі P_s , що навантажує механізм подачі; осьова P_a , що діє паралельно осі фрези.

Для визначення деформацій технологічної системи, які суттєво впливають на якість обробки, необхідно знати значення складових сили різання, що виникають при різанні одним зубом, а також сумарну силу від різання одночасно всіма зубами, що знаходяться у контакті з заготовкою ΣP_o .

Миттєве значення колової сили визначається згідно з рівнянням:

$$P_o = 0.28S_k [S_z \sin \psi t_p K_2 + l_p (\delta_o + \delta)], \tag{2}$$

де S_k – істинна напруга при розриві; t_p – глибина різання; K_2 – безрозмірний комплекс, що залежить від усадки стружки та переднього кута; l_p – сумарна довжина всіх робочих відрізків різальних кромки; δ – ширина фаски зношення; δ_o – довжина контакту задньої поверхні.

У випадку участі в процесі різання одночасно m зубів сумарна миттєва колова сила дорівнює:

$$\Sigma P_o = 0.28S_k \{ S_z t_p K_2 [\sin \psi_1 + \sin(\psi_1 + \nu) + \sin(\psi_1 + 2\nu) + \dots + \sin[\psi_1 + (m-1)\nu]] + m l_p (\delta_o + \delta) \}, \tag{3}$$

де ν – центральний кут між зубами, $\nu = 360^\circ / z$.

Кількість зубів, що одночасно беруть участь у різанні при симетричному розташуванні фрези відносно заготовки:

$$m = (2/\nu) \arcsin(B/D), \tag{4}$$

де B – ширина фрезерування; D – діаметр фрези.

При несиметричному фрезеруванні:

$$m = \{ \arccos [1 - 2(B + B_o)/D] - \arccos (1 - 2B_o/D) \} / \nu. \tag{5}$$

Миттєва сумарна сила подачі для всіх m одночасно ріжучих зубів розраховується за формулою:

$$\Sigma P_s = 0.28S_k \{ S_z t_p K_2 [\operatorname{tg}(\eta - \gamma) \sin(\varphi - \beta) \Sigma \sin^2 \psi + 0.5 \Sigma \sin 2\psi] + l_p (\delta_o + \delta) [(\sin \varphi_{cp}) (\Sigma \sin \psi) / f + \Sigma \cos \psi] \}, \tag{6}$$

де $\eta = \operatorname{arctg} f$, f – коефіцієнт тертя.

Миттєва сумарна сила паралельна осі фрези:

$$\Sigma P_a = 0.28S_k z / 2\pi \{ S_z t_p K_2 [\operatorname{tg}(\eta - \gamma) \cos(\varphi - \beta) \Sigma \sin^2 \psi + l_p (\delta_o + \delta) (\cos \varphi_{cp})^* (\Sigma \sin \psi) / f \}. \tag{7}$$

У співвідношення (1-7) входять такі параметри, як глибина різання t_p ; довжина ріжучої кромки l_p ; товщина перерізу шару, що зрізається a ; площа перерізу кожним зубом S_i .

При цьому співвідношення (1-7) значно ускладнюються, тому розрахунок сумарної миттєвої колової сили при ступінчатій схемі різання необхідно виконувати:

$$\Sigma P_o = 0.28S_k \{ S_z [t_{p1} K_{21} / \sin \psi_1 + t_{p2} K_{22} \sin(\psi_1 + \nu) + t_{p3} K_{23} / \sin(\psi_1 + 2\nu) + \dots + t_{pm} K_{2m} / \sin[\psi_1 + (m-1)\nu] + l_{p1} (\delta_{o1} + \delta_1) + l_{p2} (\delta_{o2} + \delta_2) + \dots + l_{pm} (\delta_{om} + \delta_m) \}. \tag{8}$$

У свою чергу безрозмірний комплекс K_2 дорівнює:

$$K_2 = C [(\cos \gamma) / f + \sin \gamma] / a_p. \tag{9}$$

де C – довжина контакту стружки з передньою поверхнею різця; f – коефіцієнт тертя; γ – передній кут різця.

Дослідження [3] дають можливість визначити C при коефіцієнтах усадки стружки від 1 до 10. При чистовій обробці матеріалів, коли різання здійснюється при товщинах зрізу, близьких до радіуса округлення різальних кромek, коефіцієнти усадки стружки можуть значно перевищувати наведені значення і розрахунок C , згідно з формулою:

$$K_2 = (2,05\xi - 0,55) a_p, \tag{10}$$

не дає можливості використовувати залежність (10) для розрахунків сумарних миттєвих значень сил різання.

Використання ступінчатих схем різання з радіусною формою зубів та різним осьовим положенням потребують розрахунків товщин зрізу кожним ножом у кожному мить контакту зуба із заготовкою.

Розрахунок a_p наводиться згідно з рис. 2.

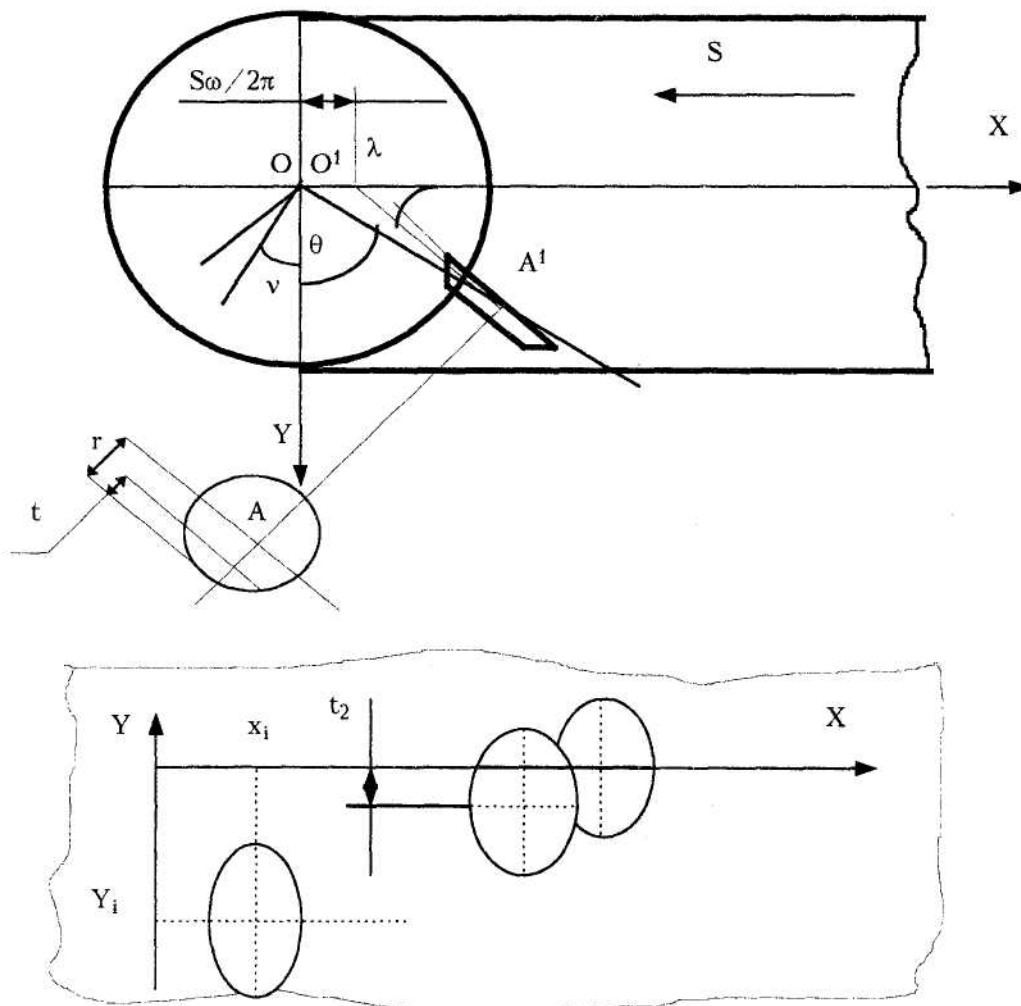


Рис. 2

Розглянемо процес фрезерування при ширині фрезерування $B = 2R$ і визначимо координати центрів пластин у січній площині з миттєвим кутом θ .

Січна площина перпендикулярна площині XOY . У ній приймемо декартову систему координат таким чином, щоб вісь Y проходила чи співпадала з віссю обертання фрези, а вісь X^1 проходила через центр пластини першого зуба.

В початковий момент фреза розташовується згідно з рис. 2. При обертанні фрези стіл із заготовкою переміщується з подачею S мм/об. Коли центр першого зуба A опиняється у площині A^1 , центр фрези O зміститься на величину $S \cdot \omega / 2\pi$, а кут між O^1A^1 і віссю OY , буде дорівнювати якійсь величині ω . Координата центра зуба A в січній площині буде визначатися таким чином: $X_a = OA^1; Y_a = -t_a$, отож необхідно визначити відстань від центра фрези до центра будь-якого зуба, коли останній буде розташовуватися в січній площині.

Із рис. 2 запишемо систему рівнянь з трьома невідомими:

$$\begin{aligned} OA_x^1 &= R_a \sin \omega + S\omega / 2\pi, \\ OA_y^1 &= R_a \cos \omega, \\ \operatorname{tg} \theta &= OA_x^1 / OA_y^1, \end{aligned} \tag{11}$$

де OA_x^1 – проекція відрізка OA^1 на вісь X ;

OA_y^1 – проекція відрізка OA^1 на вісь Y ;

R_a – радіус від центра фрези до зуба A .

Рішення системи рівнянь:

$$R_a \operatorname{tg} \theta \cos \omega - R_a \sin \omega - S \cdot \omega / 2\pi = 0, \tag{12}$$

де невідома величина кута $\omega \approx \theta$.

Вищенаведене рівняння є трансцендентним і не має точних аналітичних рішень.

Рівняння можна розкласти на дві функції:

$$Y = \sin(\omega - \theta); \tag{13}$$

$$Y = (S R_a / 2\pi) \cdot \cos \theta. \tag{14}$$

Корені рівняння (12) можуть бути обчислені графічним способом методом хорд чи дотичних. Розроблена програма «Centg», яка дозволяє обчислити координати центра будь-якого зуба в січній площині за два повних оберта фрези.

В розроблених фрезах використовується косокутня геометрія зубів, і тому циліндричні задні поверхні зубів проєціються на вибрану площину у вигляді еліпсів, тоді наступним кроком необхідно знайти координати перетинання еліпсів між собою (рис. 3).

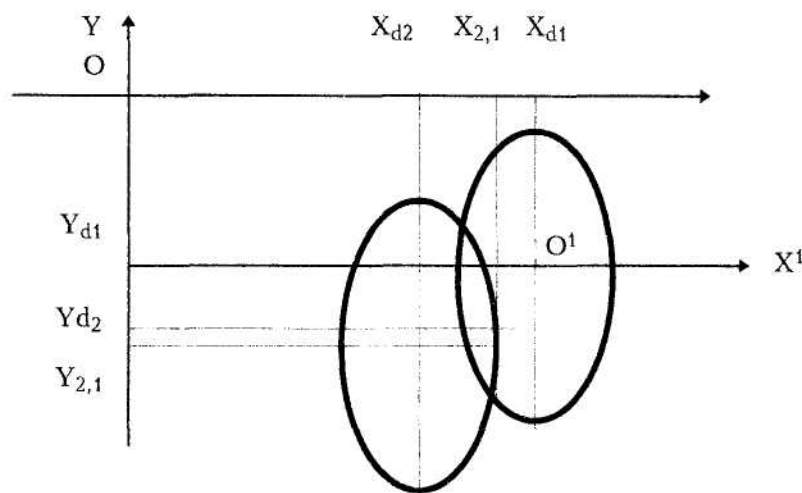


Рис. 3

Тимчасові координати центра пластин:

$$X_v = X_{d1} - X_{d2}; Y_v = Y_{d1} - Y_{d2}. \tag{15}$$

Координати перетину еліпсів знаходяться рішенням рівнянь:

$$X^2 / L^2 + Y^2 / R^2 = 1; (X - X_v)^2 / L^2 + (Y - Y_v)^2 / R^2 = 1, \tag{16}$$

де L – мала вісь еліпса; R – радіус зуба.

Рішення системи рівнянь (15) дає можливість визначити істинні координати перетину еліпсів в січній площині $X_{2,1}$ та $Y_{2,1}$:

$$X_{2,1} = X_{d(2)} + X_v; Y_{2,1} = Y_{d(2)} + Y_v \quad (17)$$

де $X_{d(2)}, Y_{d(2)}$ – координати центра еліпса номер 2 у січній площині; X_v, Y_v – координати перетину у тимчасовій системі координат $X^1O^1Y^1$.

Згідно з визначенням товщина зрізу – це довжина нормалі до поверхні різання, що проходить через точку ріжучої кромки, яка обмежена перетином шару, що зрізається. У нашому випадку ця нормаль проходить через проекцію центра поточного зуба (рис. 4).

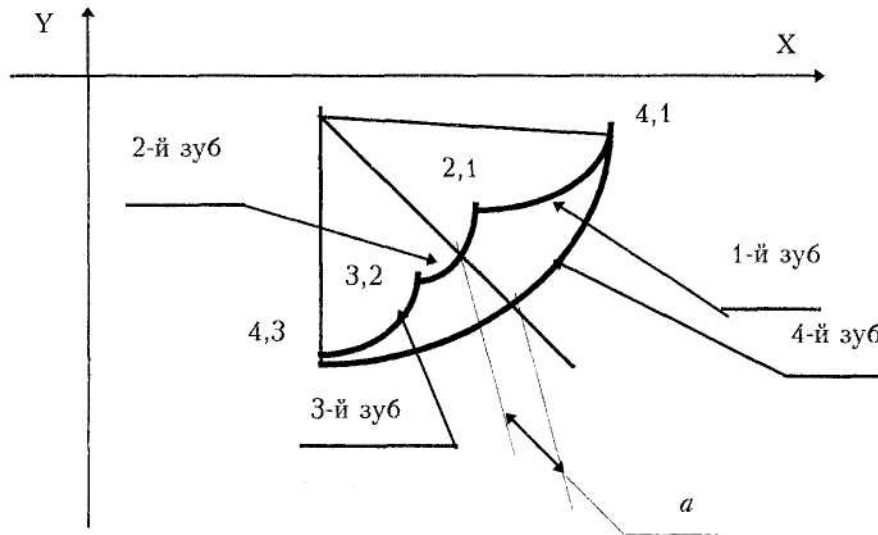


Рис. 4

Визначення максимальної товщини a шару, що зрізається, проводиться згідно з розробленим алгоритмом:

- визначається зуб, для якого проводиться розрахунок (на рис. 4, зуб 4);
- знаходяться точки перетину еліпса зуба 4 зі слідами попередніх зубів 1, 2, 3;
- перевіряються всі одержані координати і визначаються граничні точки (4, 1; 4, 3);
- визначається максимальна товщина зрізу.

Для реалізації цього алгоритму необхідна процедура розрахунку перерізів шару, що зрізається, прямою, яка проведена із центра ріжучого зуба. Тому необхідно знайти координати перетину цієї прямої із еліпсом (проекції кола на січну площину). Схема, згідно з якою виконувався розрахунок, показана на рис. 5.

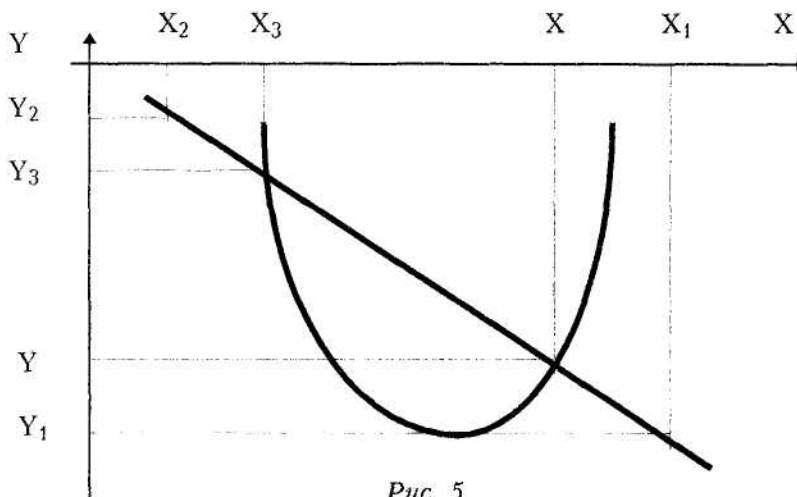


Рис. 5

Рівняння прямої, що проходить через дві точки:

$$(X - X_1)/(X_2 - X_1) = (Y - Y_1)/(Y_2 - Y_1). \quad (18)$$

Рівняння еліпса:

$$(X - X_3)^2/L^2 + (Y - Y_3)^2/R^2 = 1. \quad (19)$$

Перетворимо рівняння (18) у функцію виду $Y = f(X)$:

$$X = kY + l, \quad (20)$$

де $k = (X_2 - X_1)/(Y_2 - Y_1)$; $l = (X_1Y_2 - Y_1X_2)/(Y_2 - Y_1)$. (21)

Сумісне рішення рівнянь (19) і (20) приводить до рівняння виду:

$$AY^2 + BY + C = 0, \quad (22)$$

де $A = R^2k^2 + l^2$; $B = 2R^2kl - 2R^2kX_3 - 2l^2Y_3$; $C = R^2l^2 - 2R^2$. (23)

Дискримінант і корені рівняння:

$$D = B^2 - 4AC; Y_{1,2} = (B \pm \sqrt{D})/2A. \quad (24)$$

Якщо $D > 0$, то існує дві точки перетину, підставивши одержані значення Y_1 і Y_2 у рівняння (20), одержимо значення X_1 і X_2 . Нижня із одержаних точок і буде необхідним рішенням системи.

Тоді товщина зрізу між точками 1 і 2 (рис. 4) визначиться:

$$a = \sqrt{(X_{p2} - X_{p1})^2 + (Y_{p2} - Y_{p1})^2}. \quad (25)$$

Довжина різальної кромки – це відстань кривої еліпса між точками 4.1 та 4.3:

$$l_{kr} = \int_{X_{4.3}}^{X_{4.1}} \sqrt{1 + [f'(X)]^2} dx; \quad (26)$$

$$f(X) = - (R/L) \sqrt{(L^2 - X^2)}. \quad (27)$$

Рішення інтеграла:

$$l_{kr} = X_{4.1} - X_{4.3} + R^2 (X_{4.1}^3/3L^2 - X_{4.3}^3)/2L^2. \quad (28)$$

Підставивши граничні точки кожного еліпса у рівняння (25) одержимо значення проєкцій довжин ріжучих кромки на січну площину кожного зуба.

Для розрахунку сил різання, які виникають у процесі торцевого фрезерування, необхідно знати площі зрізу кожним зубом (рис. 6).

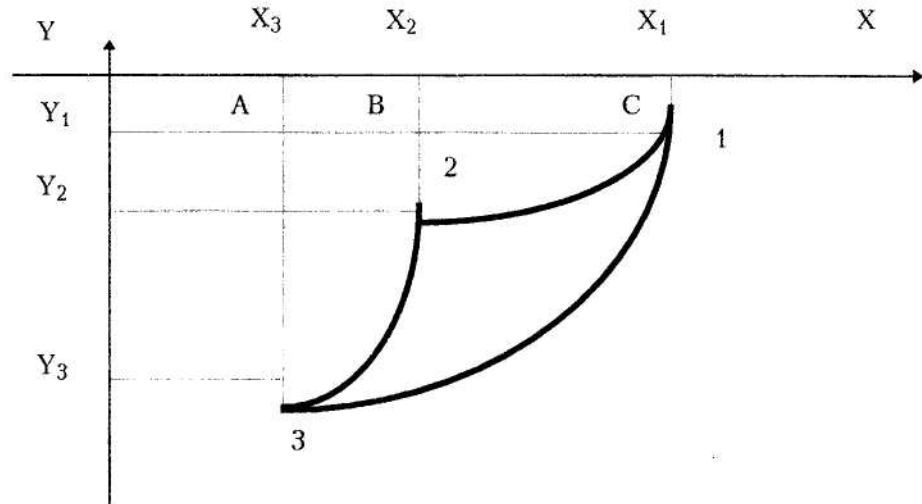


Рис. 6

Переріз 1, 2, 3 обмежений дугами 1 – 2, 2 – 3, 1 – 3 еліпсів. Координати точок перетину знаходяться згідно з процедурою «Точка Пер» (X_1, Y_1); (X_2, Y_2); (X_3, Y_3).

Площа перерізу $S_{1,2,3}$ визначається:

$$S_{1,2,3} = S_{1,3,A,C} - (S_{1,2,B,C} + S_{2,3,A,B}). \quad (29)$$

Площі фігур $S_{1,3,A,C}$; $S_{1,2,B,C}$; $S_{2,3,A,B}$ можна визначити згідно з геометричним визначенням інтеграла.

Рівняння нижньої половини еліпса:

$$S = \int_A^B f(X)dX, \tag{30}$$

де A, B – границі інтегрування.

Підставивши рівняння (27) у вираз (30), одержимо:

$$S = - (R/L)[(L^2/2)(\arcsin(B/L) + (B/2)\sqrt{(L^2 - B^2)}) + (L^2/2)* (\arcsin(A/L) + (A/2)\sqrt{(L^2 - A^2)})]. \tag{31}$$

Замість параметрів A і B у формулу підставляються координати граничних точок і визначаються відповідні площі фігур, а потім визначається згідно з (29) площа зрізаного шару.

Знайдені параметри можуть бути підставлені у вираз (8), що дає можливість виконати розрахунки сил різання.

Для виконаних розрахунків розроблена програма «Freza» на ПЕОМ, оверлейна структура якої наведена на рис. 7. Програма призначена для виконання розрахунків на ІВМ – сумісних комп'ютерах. Програма працездатна для операційної системи MS DOS 5.0 і вище. Написана у системі розробки програм Power-Basic версії 2.01f і відкомпільована стандартним компілятором.

Програма містить невеликий обсяг вхідних даних – це подача на оберт S , істинна напруга при розриві – S_k , коефіцієнт усадки стружки – ξ , кількість зубів – Z , радіальне положення зубів – R_i , осьове положення зубів – глибина різання кожним зубом фрези – t_p , радіус при вершині зубів – r_i , величина переднього кута – γ_i , величина кута нахилу ріжучої кромки – λ_i . Крім цього, вхідною характеристикою програми є кут перерізу – θ . Програма дозволяє обчислити значення складових сил різання, довжин різальних кромки, площ зрізаемого шару та максимальних товщин зрізу кожним зубом при різних геометричних параметрах ріжучої частини зубів та у різних кутах перерізу.

Порядок роботи програми такий:

- загрузається головний резидентний модуль програми, який передає управління модулю *freza.viz*.

Цей модуль згідно з конфігурацією програми *freza.ini* загрузає дані і результати, якщо такі є.

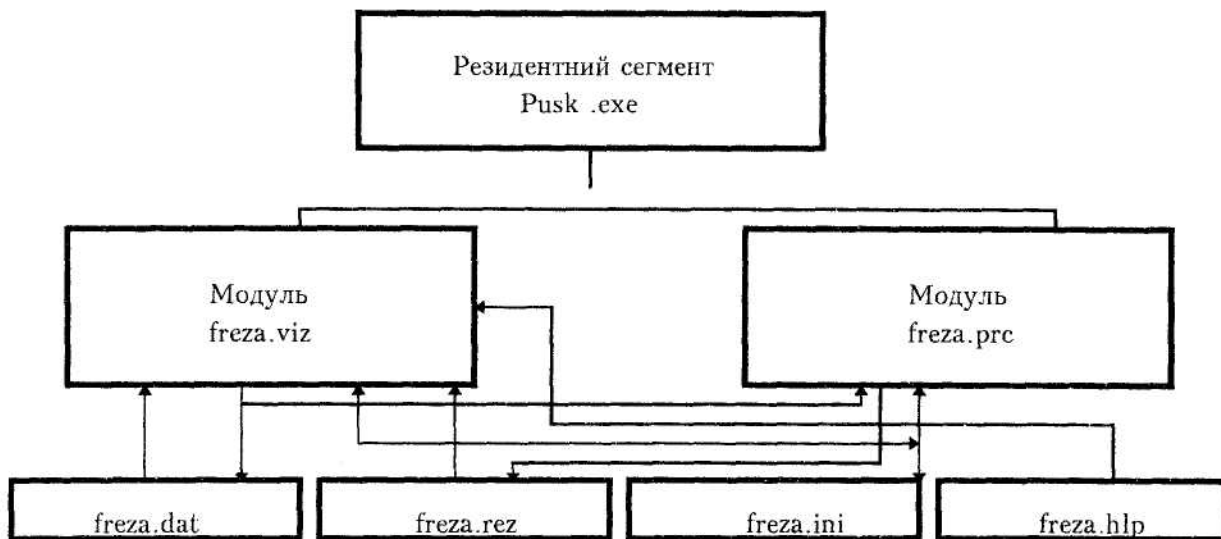


Рис. 7 Оверлейна структура програми

Потім користувач може передати управління модулю *freza.prc* для вирішення поставленої задачі.

Висновки:

1. Існуючі математичні залежності не дають можливість обчислити параметри перетину шару, що зрізається, та сили різання для випадку косокутного різання ступінчастими фрезами.
2. Авторами розроблені алгоритми обчислення основних параметрів процесів різання для спроектованих фрез.
3. Для багатоваріантного проектування фрез та обґрунтування прийнятих рішень розроблена програма на ПЕОМ.

Подальшою метою досліджень є експериментальне підтвердження математичних розрахунків сил різання, виявлення деформацій технологічної системи і їх вплив на показники якості обробки.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Розенберг А.М., Розенберг О.А.* Механика пластического деформирования в процессах резания и деформирующего протягивания. – К.: Наук. думка, 1990. – 320 с.
2. *Розенберг А.М.* Динамика фрезерования. – М.: Сов. наука, 1945. – 360 с.
3. *Полетика М.Ф.* Контактные нагрузки на режущих поверхностях инструмента. – М.: Машиностроение, 1969. – 150 с.

ВИГОВСЬКИЙ Георгій Миколайович – заступник першого проректора Житомирського інженерно-технологічного інституту.

Наукові інтереси:

- дослідження у галузі обробки металів різанням;
- проектування ріжучого інструменту.

МЕЛЬНИЧУК Петро Петрович – кандидат технічних наук, доцент, перший проректор Житомирського інженерно-технологічного інституту.

Наукові інтереси:

- дослідження у галузі механіки руйнування;
- обробка металів різанням;
- технологія машинобудування.