

П.П. Мельничук, к.т.н., доц.
Житомирський інженерно-технологічний інститут
П.Р. Родін, д.т.н., проф.
Національний технічний університет України "КПІ"

ОСНОВИ ПРОЕКТУВАННЯ ТОРЦЕВИХ ФРЕЗ З ДИФЕРЕНЦІЙОВАНИМИ СХЕМАМИ РІЗАННЯ

*Розглянуті особливості геометрії торцевих фрез для обробки плоских чистових поверхонь.
Проаналізовано вплив параметрів різальної частини на процес різання*

І. *Вихідні положення.* Ступінь досконалості конструкції різального інструмента характеризується рівномірністю навантаження і, отже, інтенсивністю зношування окремих ділянок різальних кромок. Інтенсивність зношування і, відповідно, навантаження окремих ділянок різальних кромок характеризується багатьма вхідними параметрами процесу – матеріалом заготовки та інструмента, геометричними параметрами різальної частини інструмента, формою та розмірами різальних кромок, станом технологічного обладнання, величиною припуску тощо.

Навантаження окремої точки різальної кромки інструмента з визначеними величинами геометричних параметрів різальної частини характеризується головним чином швидкістю різання V і товщиною зрізу a , котрі можуть змінюватися в часі. Швидкість різання в точці дослідження різальної кромки визначається рухом цієї точки відносно заготовки. При торцевому фрезеруванні найбільш часто швидкість різання визначається як швидкість обертання точки дослідження різальної кромки навколо осі фрези. Повільний рух подачі при цьому не враховується.

Швидкість при торцевому фрезеруванні становить:

$$V = \frac{\pi Dn}{1000} \text{ м/хв}, \quad (1)$$

де D – діаметр розміщення окремої точки різальної кромки фрези, мм:

n – число обертів фрези за хвилину.

Через зміну розміру D швидкість різання V в різних точках різальної кромки буде іншою.

Товщина зрізування є відстанню від поверхні різання до поверхні різання, що створюється різальною кромкою, суміщеною з досліджуваною. Товщина зрізу вимірюється по нормалі \bar{N} до поверхні різання.

При торцевому фрезеруванні задається подача на зуб S_z , напрямком якої не співпадає з нормаллю \bar{N} до поверхні різання. Тому товщина зрізу a при відомій S_z складає:

$$a = S_z \cdot \cos \varepsilon, \quad (2)$$

де ε – кут між векторами \bar{N} та \bar{S} . Косинус кута ε між векторами \bar{N} та \bar{S} складає:

$$\cos \varepsilon = \frac{\bar{N} \cdot \bar{S}}{|\bar{N}| \cdot |\bar{S}|}. \quad (3)$$

Тоді товщина зрізу буде:

$$a = \frac{\bar{N} \cdot \bar{S}}{|\bar{N}|}. \quad (4)$$

Вектор \bar{N} нормалі до поверхні різання визначається як векторний добуток вектора швидкості різання \bar{V} та вектора \bar{P} , що направлений по дотичній до різальної кромки в певній її точці:

$$\bar{N} = \bar{P} \cdot \bar{V}. \quad (5)$$

З метою підвищення продуктивності торцевого фрезерування доцільно збільшувати швидкість різання V та подачу S_z . На практиці збільшення швидкості різання забезпечується використанням нових прогресивних інструментальних матеріалів. В даний час такими інструментальними матеріалами є надтверді інструментальні матеріали [1]. Тому в даній роботі розглянуті геометричні особливості процесів торцевого фрезерування інструментом, що оснащений ПНТМ.

Завантаження різальної частини інструмента в цілому разом з величиною товщини зрізу, швидкості різання характеризується також величиною активної довжини різальних кромок. З точки зору

продуктивності доцільним є збільшення активної довжини різальних кромок. На торцевих фрезях це зокрема досягається шляхом використання різальних елементів з круговими різальними кромками. Однак збільшення активної довжини різальних кромок призводить до підвищення сил різання, необхідної потужності приводу верстата, деформацій технологічної системи. Тому при виборі активної довжини різальної кромки необхідно врахувати протилежно діючі фактори і встановити найбільш доцільне її значення [2].

Розподіл роботи різання між окремими різальними кромками та їх ділянками визначається прийнятою схемою зрізання припуску, що суттєво впливає на конструкцію інструмента та його стійкість. При проектуванні чистових торцевих фрез доцільно використовувати диференційовану схему зрізання припуску. Відмінною особливістю інструментів з диференційованою схемою зрізання припуску є наявність різних за призначенням різальних зубів: попередніх (чорнових) та профілюючих (чистових). Чорнові зуби не беруть участі в формуванні обробленої поверхні, що створюється чистовими зубами.

Використання диференційованої схеми зрізування припуску при проектуванні різальних інструментів дозволяє підвищити якість обробленої поверхні створивши оптимальні геометричні параметри різальної частини чистових зубів, застосовавши доцільні режими різання, використовуючи зменшену кількість чистових різальних зубів, адже при формуванні поверхні деталі багатьма зубами шорсткість обробленої поверхні підвищується.

На сьогодні проблема якості поверхневого шару деталей машин увійшла в число найважливіших проблем машинобудування. Численні дослідження показують, що зношення деталей машин значною мірою залежать від геометрії поверхні, висоти мікронерівностей та напрямлення рисок обробки. Однак вплив процесу різання і конструкцій використаних інструментів на якість обробленої поверхні та експлуатаційні властивості деталей машин вивчені, головним чином, при використанні швидкорізального та поверхневого інструмента. Тому розробка торцевих фрез, оснащених ПНТМ, для чистової обробки плоских поверхонь, в тому числі із загартованих сталей та високоміцних чавунів, є важливим для машинобудування завданням [3].

II. *Геометричні параметри різальної частини торцевої фрези.* Для визначення геометричних параметрів частини ножа фрези розглянуто точку A різальної кромки в інструментальній системі координат XVZ (рис. 1). Положення круглої пластини з ПНТМ характеризується в системі XVZ значенням кута α_n , що визначає положення осі круглої циліндричної пластини та положення передньої поверхні.

В системі XVZ вектор \bar{P} дотичний до різальної кромки:

$$\bar{P} = \bar{i}. \quad (6)$$

Вектор \bar{Z} , що співпадає з твірною задньої круглої циліндричної поверхні:

$$\bar{Z} = \bar{j} \sin \alpha_n - \bar{k} \cos \alpha_n. \quad (7)$$

Вектор \bar{N} , що проходить по лінії перетину передньої поверхні пластини на площі XV дорівнює:

$$\bar{N} = \bar{j} \cos \alpha_n + \bar{k} \sin \alpha_n. \quad (8)$$

Для встановлення ножа фрези в робоче положення систему XVZ разом з ножем повернуто відносно осі U на кут λ .

Формули перетворення координат:

$$\begin{aligned} X_1 &= X \cos \lambda - Z \sin \lambda; \\ Y_1 &= Y; \\ Z_1 &= Z \cos \lambda + X \sin \lambda. \end{aligned} \quad (9)$$

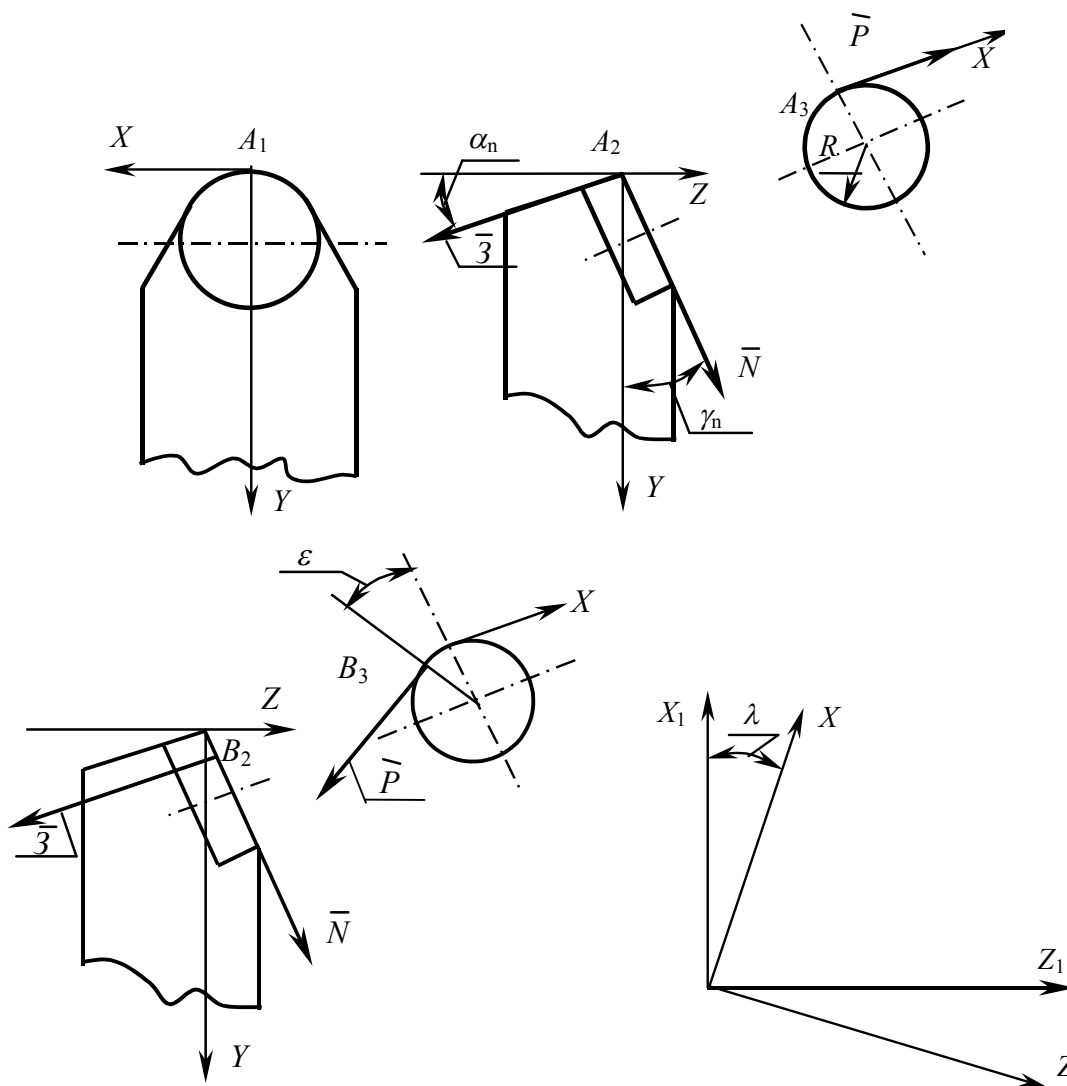


Рис. 1

Відповідно до залежностей перетворення координат в системі $X_1Y_1Z_1$ вектори \bar{P} , \bar{Z} та \bar{N} можна записати таким чином:

$$\begin{aligned} \bar{P} &= \bar{i} \cos \lambda + \bar{k} \sin \lambda; \\ \bar{N} &= \bar{i} (-\sin \alpha_n \sin \lambda) + \bar{j} \cos \alpha_n + \bar{k} \sin \alpha_n \cos \lambda; \\ \bar{Z} &= \bar{i} \cos \alpha_n \sin \lambda + \bar{j} \sin \alpha_n + \bar{k} (-\cos \alpha_n \cos \lambda). \end{aligned} \tag{10}$$

Вектор нормалі \bar{N}_n до передньої поверхні в системі $X_1Y_1Z_1$:

$$\bar{N}_n = \left| \bar{P} \times \bar{Z} \right| = \begin{vmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ \cos \lambda & 0 & \sin \lambda \\ -\sin \alpha_n \sin \lambda & \cos \alpha_n & \sin \alpha_n \cos \lambda \end{vmatrix}. \tag{11}$$

Розкривши визначник, отримаємо:

$$\bar{N}_n = \bar{i} (\cos \alpha_n \sin \lambda) - \bar{j} (\sin \alpha_n \cos^2 \lambda + \sin \alpha_n \sin^2 \lambda) + \bar{k} (\cos \lambda \cos \alpha_n), \tag{12}$$

або

$$\bar{N}_n = \bar{i} (-\cos \alpha_n \sin \lambda) - \bar{j} \sin \alpha_n + \bar{k} \cos \lambda \cos \alpha_n. \tag{13}$$

Швидкість \bar{V} точки A при різанні:

$$\bar{V} = \bar{k}.$$

В системі $X_1Y_1Z_1$ головною площиною є площина Z_1Y_1 . Задній кут у цій площині α , а передній кут $-\gamma$ (рис. 2). Вектор, що проходить по лінії перетину передньої поверхні та головної січної площини Z_1Y_1 становить:

$$\bar{C} = \bar{j} - \bar{k} \operatorname{tg} \gamma. \tag{14}$$

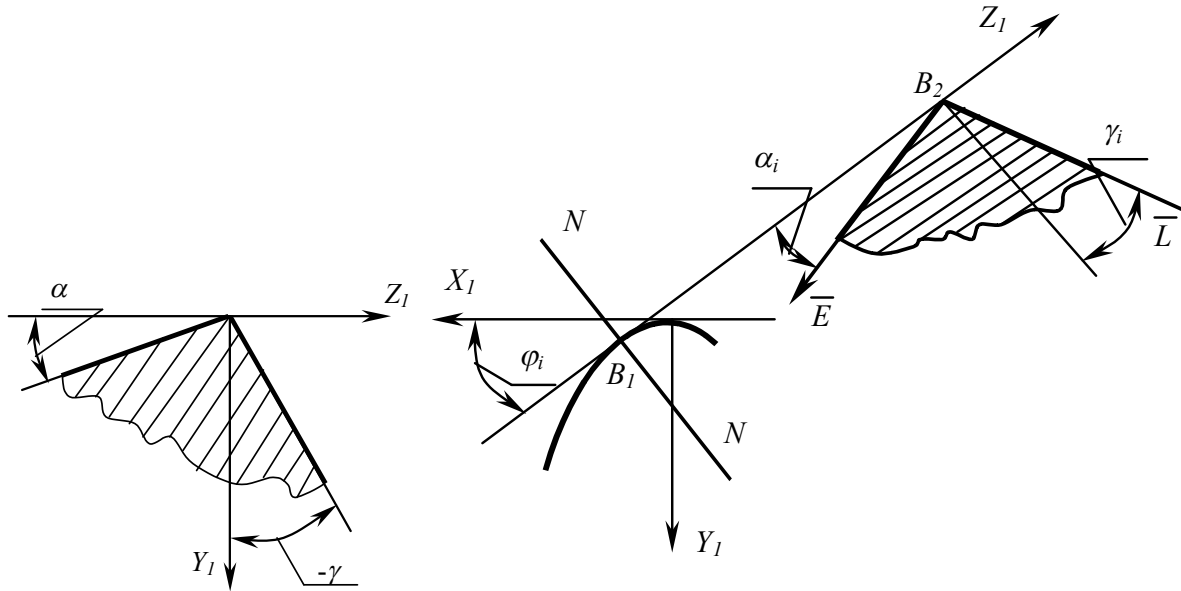


Рис. 2

Вектор \bar{N}_n нормалі до передньої поверхні та вектор \bar{C} , що лежить на передній поверхні (рис. 3), взаємно перпендикулярні.

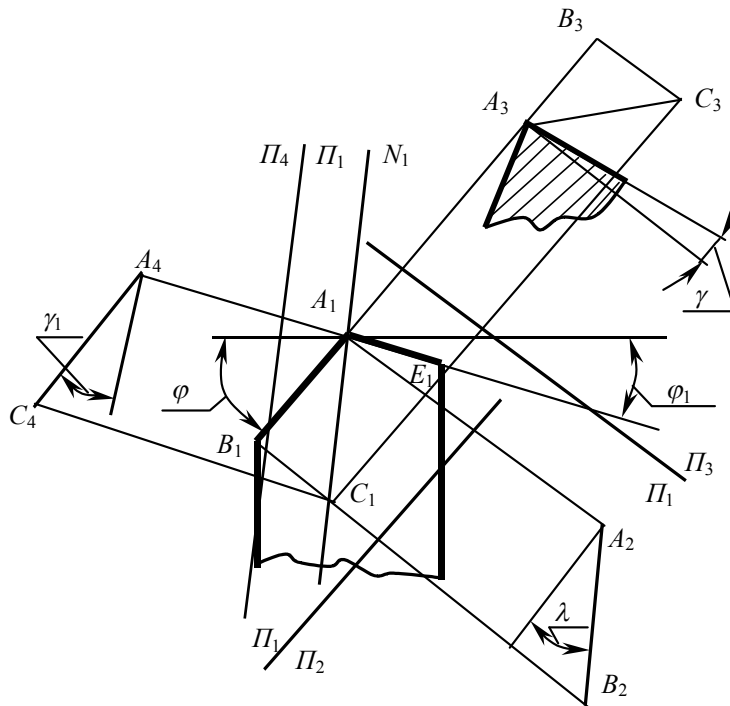


Рис. 3

Отже,

$$\bar{N}_n \cdot \bar{C} = -\sin \alpha_n - \operatorname{tg} \gamma \cdot \cos \lambda \cdot \cos \alpha_n = 0. \quad (15)$$

Звідси

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{-\operatorname{tg} \alpha_n}{\cos \lambda}. \quad (16)$$

Вектор \bar{B} , що направлений по дотичній до лінії перетину задньої поверхні та головної січної площини Z_1V_1 (рис. 2, 4), визначається з виразу:

$$\bar{B} = \bar{j} \operatorname{tg} \alpha - \bar{k}. \quad (17)$$

Три вектори \bar{P} , \bar{Z} та \bar{B} лежать в одній площині, що дотикається задньої поверхні у вершинній точці A різальної кромки.

Отже,

$$(\bar{P} \times \bar{Z}) \cdot \bar{B} = 0. \quad (18)$$

Запишемо цей мішаний добудок в координатній формі:

$$\begin{vmatrix} \cos \lambda & 0 & \sin \lambda \\ \cos \alpha_n \sin \lambda & \sin \alpha_n & (-\cos \alpha_n \cos \lambda) \\ 0 & \operatorname{tg} \alpha & -1 \end{vmatrix} = 0. \quad (19)$$

Розкривши визначник, отримаємо:

$$-\cos \lambda \sin \alpha_n + \operatorname{tg} \alpha \cos \alpha_n \cos^2 \lambda + \operatorname{tg} \alpha \cos \alpha_n \sin^2 \lambda = 0. \quad (20)$$

Звідси:

$$\operatorname{tg} \alpha = \operatorname{tg} \alpha_n \cos \lambda. \quad (21)$$

Таким чином, при фрезеруванні плоскої поверхні передній кут γ та задній кут α у вершинній точці різальної кромки, при їх визначенні в головній січній площині, встановлюються із залежностей:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \gamma &= -\frac{\operatorname{tg} \alpha_n}{\cos \lambda}; \\ \operatorname{tg} \alpha &= \operatorname{tg} \alpha_n \cos \lambda. \end{aligned} \quad (22)$$

Аналогічні залежності були отримані при графічному розв'язку розглянутої задачі. Статичні геометричні параметри визначались для довільної точки B різальної кромки (рис. 1). В системі XVZ одиничний вектор \bar{P} дотичний до кругової різальної кромки в точці B , положення котрої визначається кутом ε , буде:

$$\bar{P} = \bar{i} \cos \varepsilon + \bar{j} \sin \varepsilon \cos \alpha_n + \bar{k} \sin \varepsilon \sin \alpha_n. \quad (23)$$

Вектор \bar{n} , що співпадає з передньою поверхнею дорівнює:

$$\bar{N} = \bar{j} \cos \alpha_n + \bar{k} \sin \alpha_n. \quad (24)$$

Вектор \bar{Z} , направлений по твірній задньої круглої циліндричної поверхні, знаходиться таким чином:

$$\bar{Z} = \bar{j} \sin \alpha_n - \bar{k} \cos \alpha_n. \quad (25)$$

За формулами перетворення координат розглянуті вектори в системі $X_1Y_1Z_1$ в довільній точці різальної кромки описуються виразами:

$$\begin{aligned} \bar{Z} &= \bar{i} \cos \alpha_n \sin \lambda + \bar{j} \sin \alpha_n + \bar{k} (-\cos \alpha_n \cos \lambda); \\ \bar{N} &= -\bar{i} (\sin \alpha_n \sin \lambda) + \bar{j} \cos \alpha_n + \bar{k} \sin \alpha_n \cos \lambda; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{P} = & \bar{i} (\cos \varepsilon \cos \lambda - \sin \varepsilon \sin \alpha_n \sin \lambda) + \bar{j} \sin \varepsilon \cos \alpha_n + \\ & + \bar{k} (\sin \varepsilon \sin \alpha_n \cos \lambda + \cos \varepsilon \sin \lambda). \end{aligned} \quad (26)$$

Як припущення прийнято, що вектор \bar{V} швидкості різання в точці B паралельний осі Z_1 :

$$\bar{V} = \bar{k}. \quad (27)$$

Кут між векторами \bar{V} та \bar{P} становить $90^\circ - \lambda_i$, де λ_i – кут нахилу різальної кромки у вибраній точці B . Тоді:

$$\cos(90^\circ - \lambda_i) = \frac{(\bar{P} \cdot \bar{V})}{\sqrt{|\bar{P}|^2 \cdot |\bar{V}|^2}}. \quad (28)$$

Оскільки вектори \bar{P} та \bar{V} є одиничними, то

$$\sin \lambda_i = \sin \varepsilon \sin \alpha_n \cos \lambda + \cos \varepsilon \sin \lambda. \quad (29)$$

При $\varepsilon = 0^\circ$ маємо з (29): $\sin \lambda_i = \sin \lambda$ та $\lambda_i = \lambda$, що й очікувалось.

Кут у плані розраховується з виразу:

$$\operatorname{tg} \varphi_i = \frac{P_y}{P_x} = \frac{\sin \varepsilon \cos \alpha_n}{\cos \varepsilon \cos \lambda - \sin \varepsilon \sin \alpha_n \sin \lambda}. \quad (30)$$

При $\varepsilon = 0^\circ$ значення $\operatorname{tg} \varphi_i = 0$ та $\varphi_i = 0$.

Нормаль \bar{N}_3 до задньої поверхні в точці B різальної кромки становить:

$$\bar{N}_3 = \bar{P} \times \bar{V} = \begin{vmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ (\cos \varepsilon \cos \lambda - \sin \varepsilon \sin \alpha_n \sin \lambda) & \sin \varepsilon \cos \alpha_n & (\sin \varepsilon \sin \alpha_n \cos \lambda + \cos \varepsilon \sin \lambda) \\ \cos \alpha_n \sin \lambda & \sin \alpha_n & -\cos \alpha_n \cos \lambda \end{vmatrix}. \quad (31)$$

Розкривши визначник, отримаємо:

$$\begin{aligned} \bar{N}_3 = & \bar{i} (-\sin \varepsilon \cos^2 \alpha_n \cos \lambda - \sin^2 \alpha_n \sin \varepsilon \cos \lambda - \sin \alpha_n \cos \varepsilon \sin \lambda) + \\ & + \bar{j} (\cos \varepsilon \cos^2 \lambda \cos \alpha_n - \sin \varepsilon \sin \alpha_n \cos \alpha_n \sin \lambda \cos \lambda + \\ & + \cos \alpha_n \sin \alpha_n \cos \lambda \sin \varepsilon \sin \lambda + \cos \alpha_n \sin^2 \lambda \cos \varepsilon) + \\ & + \bar{k} (\sin \alpha_n \cos \varepsilon \cos \lambda - \sin \varepsilon \sin^2 \alpha_n \sin \lambda - \sin \varepsilon \cos^2 \alpha_n \sin \lambda), \end{aligned} \quad (32)$$

або

$$\begin{aligned} \bar{N}_3 = & \bar{i} (-\sin \varepsilon \cos \lambda - \sin \alpha_n \cos \varepsilon \sin \lambda) + \bar{j} (\cos \varepsilon \cos \alpha_n) + \\ & + \bar{k} (\sin \alpha_n \cos \varepsilon \cos \lambda - \sin \varepsilon \sin \lambda). \end{aligned} \quad (33)$$

В довільній точці B по дотичній до лінії перетину головної січної площини $N-N$ і задньої поверхні проведемо вектор \bar{E} . В системі $X_1 Y_1 Z_1$ вектор \bar{E} визначається таким чином:

$$\bar{E} = \bar{i} (-\sin \varphi_i) + \bar{j} \cos \varphi_i + \bar{k} (-\operatorname{ctg} \alpha_i), \quad (34)$$

де α_i – задній кут в довільній точці B різальної кромки.

Вектор нормалі \bar{N}_3 до задньої поверхні й вектор \bar{E} є взаємно перпендикулярними векторами. Отже $(\bar{N}_3 \cdot \bar{E}) = 0$.

Звідси:

$$\begin{aligned} \sin \varphi_i \sin \varepsilon \cos \lambda + \sin \alpha_n \cos \varepsilon \sin \lambda \sin \varphi_i + \cos \varphi_i \cos \varepsilon \cos \alpha_n - \\ - \operatorname{ctg} \alpha_i \sin \alpha_n \cos \varepsilon \cos \lambda + \operatorname{ctg} \alpha_i \sin \varepsilon \sin \lambda = 0. \end{aligned} \quad (35)$$

У вершинній точці A при $\varepsilon = 0^\circ$ та $\varphi_i = 0^\circ$ маємо:

$$\operatorname{ctg} \alpha_i = \frac{\cos \alpha_n}{\sin \alpha_n \cos \lambda}, \quad (36)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_i = \operatorname{tg} \alpha_n \cos \lambda. \quad (37)$$

Аналогічне співвідношення (21) отримано при безпосередньому розгляді геометрії вершинної точки A різальної кромки.

Нормаль \bar{N}_n до передньої поверхні в довільній точці B різальної кромки становить:

$$\bar{N}_n = \bar{P} \times \bar{N}. \quad (38)$$

В координатній формі цей векторний добуток має вигляд:

$$\bar{N}_n = \begin{vmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ (\cos \varepsilon \cos \lambda - \sin \varepsilon \sin \alpha_n \sin \lambda) & \sin \varepsilon \cos \alpha_n & (\sin \varepsilon \sin \alpha_n \cos \lambda + \cos \varepsilon \sin \lambda) \\ -\sin \alpha_n \sin \lambda & \cos \alpha_n & \sin \alpha_n \cos \lambda \end{vmatrix}. \quad (39)$$

Розкривши визначник отримаємо:

$$\begin{aligned} \bar{N}_n = & \bar{i} (\sin \varepsilon \cos \lambda \cos \alpha_n \sin \alpha_n - \cos \alpha_n \sin \varepsilon \sin \alpha_n \cos \lambda - \cos \alpha_n \cos \varepsilon \sin \lambda) - \\ & - \bar{j} (\cos \varepsilon \cos \lambda \sin \alpha_n \cos \lambda - \sin \varepsilon \sin \alpha_n \sin \lambda \sin \alpha_n \cos \lambda + \\ & + \sin \alpha_n \sin \lambda \sin \varepsilon \sin \alpha_n \cos \lambda + \sin \alpha_n \sin \lambda \cos \varepsilon \sin \lambda) + \\ & + \bar{k} (\cos \varepsilon \cos \lambda \cos \alpha_n - \sin \varepsilon \sin \alpha_n \sin \lambda \cos \alpha_n + \sin \alpha_n \sin \lambda \sin \varepsilon \cos \alpha_n). \end{aligned} \quad (40)$$

Здійснивши перетворення, отримаємо:

$$\bar{N}_n = \bar{i} (-\cos \alpha_n \cos \varepsilon \sin \lambda) - \bar{j} \cos \varepsilon \sin \alpha + \bar{k} \cos \varepsilon \cos \lambda \cos \alpha_n. \quad (41)$$

В довільній точці B по лінії перетину головної січної площини $N-N$ і передньої поверхні проведемо вектор \bar{L} . В системі $X_1Y_1Z_1$ вектор \bar{L} визначається таким чином:

$$\bar{L} = \bar{i} (-\sin \varphi) + \bar{j} \cos \varphi - \bar{k} \operatorname{tg} \gamma_i, \quad (42)$$

де γ_i – передній кут у головній січній площині $N-N$ в довільній точці B різальної кромки.

Вектор нормалі \bar{N}_n до передньої поверхні й вектор \bar{L} , що розташований на передній поверхні, взаємно перпендикулярні і, отже, їх скалярний добуток дорівнює нулю:

$$(\bar{N}_n \cdot \bar{L}) = \sin \varphi \cos \alpha_n \cos \varepsilon \sin \lambda - \cos \varphi \cos \varepsilon \sin \alpha_n - \operatorname{tg} \gamma_i \cos \varepsilon \cos \lambda \cos \alpha_n \quad (43)$$

Звідси:

$$\operatorname{tg} \gamma_i = \frac{\sin \varphi \cos \alpha_n \cos \varepsilon \sin \lambda - \cos \varphi \cos \varepsilon \sin \alpha_n}{\cos \varepsilon \cos \lambda \cos \alpha_n}, \quad (44)$$

та після перетворення:

$$\operatorname{tg} \gamma_i = \sin \varphi \cdot \operatorname{tg} \lambda - \frac{\operatorname{tg} \alpha_n \cos \varphi}{\cos \lambda}. \quad (45)$$

У вершинній точці A при $\varphi = 0$ маємо:

$$\operatorname{tg} \gamma_i = -\frac{\operatorname{tg} \alpha_n}{\cos \lambda}. \quad (46)$$

Звідси

$$\operatorname{tg} \alpha_n = -\operatorname{tg} \gamma_i \cos \lambda. \quad (47)$$

Аналогічне співвідношення було отримано при безпосередньому розгляді геометрії вершинної точки A різальної кромки.

Аналіз результатів розрахунків (за вище отриманими залежностями) геометричних параметрів різальної кромки при чистовій обробці плоских поверхонь з малими глибинами різання t показує порівняно невеликі їх коливання на активній довжині різальної кромки. Інша картина існує при використанні торцевих фрез з прямолінійними різальними кромками. На рис. 3 графічно визначений динамічний передній кут γ_1 для ножа торцевої фрези з прямолінійною головною різальною кромкою AB та прямолінійною допоміжною різальною кромкою AE . Геометричні параметри різальної частини ножа були прийняті такими:

- передній кут $\gamma = -10^\circ$;
- головний кут в плані $\varphi = 45^\circ$;
- допоміжний кут в плані $\varphi_1 = 15^\circ$;
- кут нахилу різальної кромки $\lambda = 30^\circ$.

Графічно встановлений допоміжний передній кут $\gamma_1 = -31^\circ$. При відомих значеннях γ , φ , φ_1 та λ кут γ_1 визначається за виразом:

$$\operatorname{tg} \gamma_1 = \operatorname{tg} \gamma \cos(\varphi + \varphi_1) - \operatorname{tg} \lambda \sin(\varphi + \varphi_1). \quad (48)$$

Таким чином, при великих значеннях кута нахилу різальної кромки λ утворюються від'ємні допоміжні передні кути γ_1 значної величини, що знижує працездатність інструмента та якість обробленої поверхні. Тому доцільно при великих значеннях кута нахилу різальної кромки λ проектувати чистові торцеві фрези з круговими різальними кромками. Кути α та γ , виміряні в головній січній площині, визначаються залежностями (22).

III. Вплив кута нахилу різальної кромки на процес різання.

Існуючі різноманітні методи обробки різанням можуть бути проведені до таких основних випадків:

- а) вільне різання, – коли в роботі бере участь одна прямолінійна різальна кромка;
- б) невольне різання, – коли в роботі бере участь декілька різальних кромок або фасонна різальна кромка;
- в) прямокутне різання, – коли вектор швидкості різання перпендикулярний до різальної кромки;
- г) косокутне різання, – коли вектор швидкості різання не перпендикулярний до різальної кромки.

Аналізуючи вплив кута нахилу різальної кромки λ на процес різання металів розглянемо вільне різання, – коли в роботі бере участь одна прямолінійна різальна кромка. Реальним процесом такої обробки є стругання плоскої поверхні широким різцем (рис. 4) [4]. Кут нахилу різальної кромки λ між нормаллю \bar{N} до різальної кромки та вектором швидкості різання \bar{V} вимірюється в площині різання. Він може мати позитивні та від'ємні значення. Якщо дивитись на площину різання, то при позитивних кутах нахилу різальної кромки λ поворот вектора швидкості різання \bar{V} до суміщення з вектором \bar{N} відносно осі, перпендикулярній до площини різання, здійснюється за годинниковою стрілкою. При від'ємному куті нахилу різальної кромки поворот вектора швидкості різання \bar{V} до суміщення з вектором \bar{N} здійснюється проти руху годинникової стрілки.

Нахилене положення різальної кромки відносно вектора швидкості різання \bar{V} призводить до відхилення сходу стружки по передній поверхні від перпендикуляра AB до різальної кромки, розміщені на передній поверхні P , в ту чи іншу сторону залежно від знаку кута λ . Це положення дозволяє шляхом вибору значення та знаку кута нахилу різальної кромки λ направляти сходження стружки в бажаному напрямку. Направлення сходу стружки по передній поверхні характеризується кутом η , який вимірюється на передній поверхні P і замкнений між нормаллю AB до різальної кромки та направленням AE руху стружки по передній поверхні.

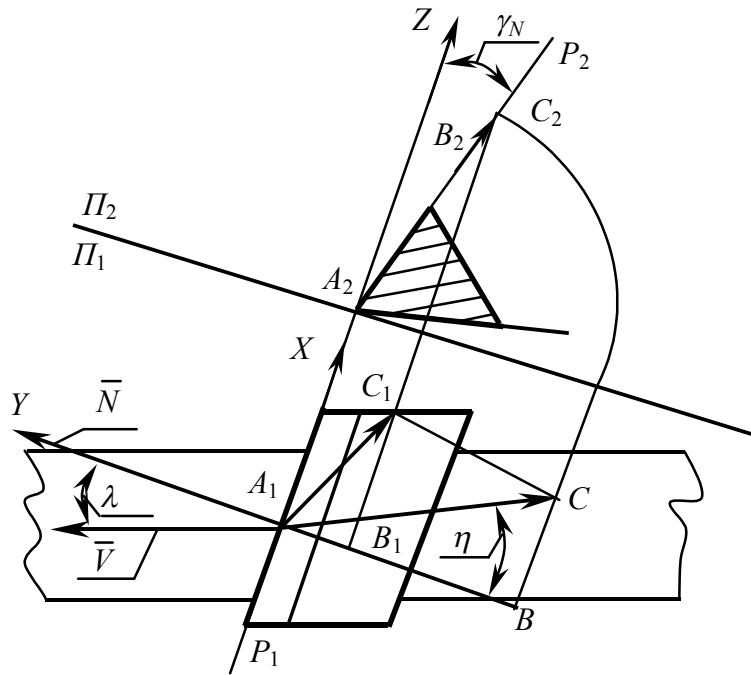


Рис. 4

Дослідження [5, 6] показують, що кут сходження стружки η за значенням більший кута нахилу різальної кромки λ . Різниця кутів η та λ зростає зі збільшенням кута λ та товщини зрізуваного шару. Найбільша різниця кутів λ та η дорівнює $6^\circ \div 8^\circ$. При малих товщинах зрізу можна рахувати, що кут сходження стружки η рівний куту нахилу різальної кромки λ [5].

Через те, що кут нахилу різальної кромки λ визначає напрямок сходження стружки по передній поверхні, проф. Г.І. Грановський запропонував [4] робочий (фактичний) передній кут γ вимірювати в площині сходження стружки. Площина сходження стружки це – площина, що проходить через напрямок AC сходження стружки та вектор швидкості різання \bar{V} в розглянутій точці різальної кромки. При цьому передбачалось, що вплив на процес різання переднього кута і кута нахилу різальної кромки λ можна оцінювати впливом тільки одним робочим (дійсним) переднім кутом γ_p .

За напрямком сходження стружки проведено на передній поверхні вектор \bar{N} . Довжину його вибрано так, щоб значення його проекції на площину YZ дорівнювало одиниці.

$$\bar{N} = \bar{i} \operatorname{tg} \eta - \bar{j} \sin \gamma_n + \bar{k} \cos \gamma_n, \tag{49}$$

де γ_n – передній кут в нормальному до різальної кромки перерізі.

Одиничний вектор \bar{V} швидкості різання буде становити:

$$\bar{V} = -\bar{i} \sin \lambda + \bar{j} \cos \lambda. \tag{50}$$

За визначенням кут між векторами \bar{N} та \bar{V} дорівнює $90^\circ - \gamma_p$.

Отже:

$$\sin \gamma_p = \frac{\bar{N} \cdot \bar{V}}{|\bar{N}| \cdot |\bar{V}|}. \tag{51}$$

Скалярний добуток $(\bar{N} \cdot \bar{V})$ дорівнює:

$$\bar{N} \cdot \bar{V} = -\sin \lambda \operatorname{tg} \eta - \cos \lambda \cdot \sin \gamma_n. \tag{52}$$

Довжина вектора \bar{N} дорівнює:

$$|\bar{N}| = \sqrt{\operatorname{tg}^2 \eta + \sin^2 \gamma_n + \cos^2 \gamma_n} = \pm \frac{1}{\cos \eta}. \tag{53}$$

Таким чином:

$$\sin \gamma_p = (\operatorname{tg} \eta \cdot \sin \lambda + \cos \lambda \sin \gamma_N) \cos \eta, \quad (54)$$

або

$$\sin \gamma_p = \sin \eta \sin \lambda + \sin \gamma_N \cos \lambda \cos \eta. \quad (55)$$

При прямокутному різанні при $\lambda = 0^\circ$ і $\eta = 0^\circ$ будемо мати:

$$\sin \gamma_p = \sin \gamma_N. \quad (56)$$

Доцільність вимірювання робочого (дійсного) переднього кута в напрямку, що співпадає з рухом стружки по передній поверхні, підтверджено в роботах Б.В. Соколова, С.Ф. Глебова, О.І. Панкіна та ін. Так, в роботі [8] М.О. Розно показує, що стійкість фрези зі збільшенням кута нахилу різальної кромки λ від 10° до 60° зростає в 3–5 рази.

На думку автора роботи [8] одним із основних факторів підвищення стійкості фрези зі зростанням кута нахилу кромки λ є збільшення робочого (фактичного) переднього кута γ_p , встановленого в площині сходження стружки.

Цілий ряд глибоких досліджень [5, 7] не підтвердили основного положення про те, що роль кута нахилу різальної кромки λ можна звести до зміни значення переднього кута γ . Експериментально було доказано [5], що зміщення матеріалу вздовж різальної кромки не викликає додаткової деформації в напрямку, перпендикулярному до умовної площини зсуву, а складова сили різання вздовж вектора швидкості різання \bar{V} є прямою функцією переднього кута γ_N в нормальному до різальної кромки перерізі, а не робочого переднього кута γ_p , встановленого в площині сходження стружки. Тому при $\lambda \neq 0$ передній кут γ_N в нормальному до різальної кромки перерізі доцільно вважати кутом, що відповідає передньому куту відповідним до переднього кута при прямокутному різанні. Кут нахилу різальної кромки λ впливає на процес різання не тільки через зміну переднього кута та коефіцієнта тертя, а й безпосередньо є особливим самостійним фактором.

При косокутному різанні рух різального інструмента зі швидкістю V можна розкласти [2] на два рухи (рис. 5):

$$\bar{V} = \bar{V}_1 + \bar{V}_2. \quad (57)$$

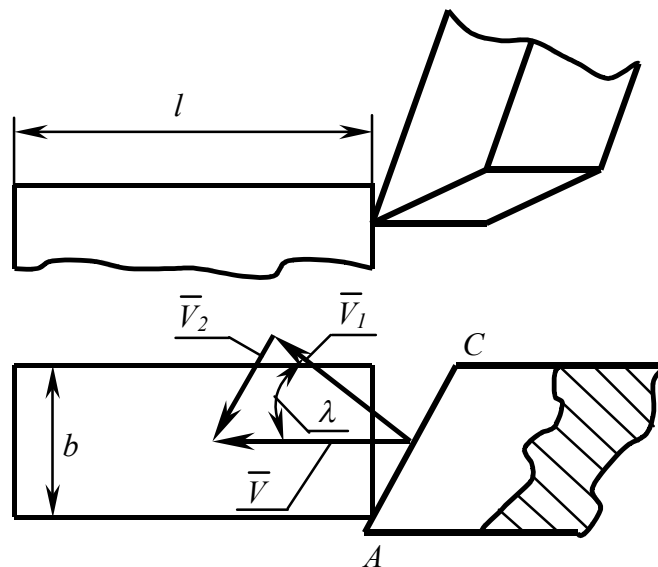


Рис. 5

Рух зі швидкістю \bar{V}_2 призводить до ковзання прямолінійної різальної кромки і, відповідно, передніх та задніх поверхонь, самих по собі [6]. Вектор швидкості \bar{V}_1 , перпендикулярний до різальної кромки. Тому при здійсненні одного руху зі швидкістю V процес різання буде відповідати прямокутному різанню.

При здійсненні тільки одного руху зі швидкістю \bar{V}_2 різання відсутнє. Отже, основна різниця процесів прямокутного ($\lambda = 0^\circ$) і косокутного ($\lambda \neq 0^\circ$) різання полягає в тому, що при косокутному різанні поряд з рухом, що перпендикулярний різальній кромці, здійснюється також рух уздовж різальної кромки.

Значення швидкості V_1 та V_2 при відомій швидкості різання V визначається таким чином:

$$\begin{aligned} V_1 &= V \cdot \cos \lambda; \\ V_2 &= V \cdot \sin \lambda. \end{aligned} \quad (58)$$

При русі інструмента зі швидкістю V стружка буде зсуватись вздовж різальної кромки, в результаті чого зміниться кут сходження стружки η . Тому про ступінь впливу кута нахилу різальної кромки λ на процес різання можна оцінювати з різниці $\eta - \lambda$.

Виконані експериментальні дослідження показують, що при чистовому різанні кут сходження стружки дорівнює куту нахилу різальної кромки. Тому в першому наближенні при чистовому різанні можливо не враховувати рух інструмента зі швидкістю V_2 . Тобто процес чистового косокутного різання зі швидкістю V можна порівняти з процесом прямокутного різання зі швидкістю V_1 , що дорівнює:

$$V_1 = V \cdot \cos \lambda.$$

Таким чином, вплив кута нахилу різальної кромки λ при чистовому косокутному різанні можна звести до зменшення швидкості різання. В результаті зменшення умовної швидкості V_1 відповідно і зростає стійкість T різального інструмента.

В табл. 1 наведено результати досліджень стійкості швидкорізальних різців при прямокутному різанні з $\lambda = 0$ та косокутному різанні з кутом $\lambda = 45^\circ$, заднім кутом $\alpha = 20^\circ$, переднім кутом $\varphi = 10^\circ$. Дослідження виконувались при подачі $S = 0,34$ мм/об.

Таблиця 1

λ°	0	45	0	45	0	45
V , м/хв	65	100	60	90	55	90
T , хв	45	45	70	70	100	100
V/V_1	1,5		1,5		1,45	

Для $\lambda = 45^\circ$ відношення V/V_1 , відповідно до запропонованої гіпотези, становить:

$$\frac{V}{V_1} = \frac{1}{\cos \lambda} = \frac{1}{0,707} = 1,4. \quad (59)$$

Таким чином, відношення V/V_1 (59) відрізняються від експериментальних даних в межах $3,5 \div 7\%$.

Враховуючи те, що швидкість різання V достатньо і різнопланово впливає на вихідні параметри процесу та оптимальні значення вхідних параметрів, відповідно і кут нахилу різальної кромки λ також різнопланово впливає на процес різання – збільшення чи зменшення кута нахилу різальної кромки λ позитивно впливає на одні сторони процесу і негативно впливає на інші його сторони.

Значення і знак кута нахилу різальної кромки λ впливає на умови врізання в матеріал заготовки таких інструментів, як різці та торцеві фрези. При від'ємних кутах λ точкою початкового контакту є вершина інструмента – найбільш вразлива точка різальної кромки. При позитивних кутах λ точка початкового контакту вказаних інструментів з матеріалом заготовки дещо віддалена від вершини. Зі збільшенням кута λ точка початкового контакту, з заготовкою більше віддаляється від вершини. При цьому час на врізання та збільшення навантаження зростає, що позитивно впливає на процес різання. Тому різці та торцеві фрези з прямолінійними різальними кромками проектується з позитивними кутами нахилу головної різальної кромки. З іншого боку збільшення кута нахилу головної різальної кромки λ призводить до зростання від'ємних значень передніх кутів на допоміжній різальній кромці.

В результаті аналізу цих протилежних тенденцій визначається значення кута нахилу різальної кромки λ , котра для вказаних інструментів знаходиться в межах $3^\circ \dots 15^\circ$. При більших значеннях λ ($30^\circ \dots 45^\circ$) зношення різця по задній поверхні переходить на допоміжну різальну кромку.

Таким чином, кут нахилу різальної кромки λ є незалежним самостійно діючим фактором процесу різання.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Инструменты из сверхтвердых материалов. Учебное пособие / Под общей редакцией Н.В. Новикова. – Киев, 2002. – 528 с.

2. *Равська Н.С., Мельничук П.П., Касьянов А.Г., Родін Р.П.* Технологія інструментального виробництва. – ЖІТІ, 2001. – 555 с.
3. *Виговский Г.Н., Мельничук П.П.* Конструкции и эксплуатация торцевых фрез с ножами из сверхтвердого материала // Тяжелое машиностроения. – 1999. – № 6. – С. 25–27.
4. *Грановский Г.И.* Кинематика резания – М.: Машгиз, 1948. – 200 с.
5. *Бобров В.Ф.* Влияние кута наклона главной режущей кромки инструмента на процесс резания металлов. – М.: Машгиз, 1962. – 52 с.
6. *Бобров В.Ф.* Основы теории резания металлов. – М.: Машиностроение, 1975. – 344 с.
7. *Амарего, Брази.* Обработка металлов резанием. – М.: Машиностроение, 1977. – 325 с.
8. *Розно Н.А.* Винтовые инструменты с твердых сплавов // Станки и инструмент. – 1957 – № 11.

МЕЛЬНИЧУК Петро Петрович – кандидат, технічних наук, доцент, завідувач кафедри технології машинобудування та конструювання технічних систем, ректор Житомирського інженерно-технологічного інституту.

Наукові інтереси:

- технологія машинобудування.

РОДІН Петро Родіонович – доктор технічних наук, професор Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”, член-кореспондент Академії Наук України.

Наукові інтереси:

- технологія машинобудування.

Подано 12.05.2002

Мельничук П.П., Родін П.Р. Основи проектування торцевих фрез з диференційованими схемами різання

Мельничук П.П., Родін П.Р. Основы проектирования торцевых фрез с дифференцированными схемами резания

УДК 621.914

Основы проектирования торцевых фрез с дифференцированными схемами резания / П.П. Мельничук, П.Р. Родін

Рассмотрены особенности геометрии торцевых фрез для обработки плоских чистовых поверхностей. Проанализировано влияние параметров режущей части на процесс резания.