

УДК 621.923

РОТОРНІ ВЕРСТАТИ ДЛЯ МАГНІТНО-АБРАЗИВНОЇ ОБРОБКИ НА БАЗІ МАГНІТНОЇ СИСТЕМИ ТИПУ "КІЛЬЦЕВА ВАННА": КІНЕМАТИКА ОБРОБКИ СПРАЛЬНИХ СВЕРДЕЛ

Гейчук В.М., к.т.н., доц.

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут", м. Київ

E-mail: geychukw@mail.ru, poroshin@online.ua, kvm@users.ntu-kpi.kiev.ua

Ранее разработана математическая модель кинематики магнитно-абразивной обработки дисковых фрез на роторных станках с магнитной системой типа "кольцевая ванна". Проведенные с ее помощью исследования позволили установить, что при традиционных соотношениях величин составляющих суммарной скорости резания рабочие поверхности зубьев находятся в неблагоприятных условиях. Выбор определенных размеров ротора и "кольцевой ванны" и изменение соотношений величин составляющих суммарной скорости резания дает возможность управлять величинами углов атаки. Разработана математическая модель кинематики магнитно-абразивной обработки передней поверхности спиральных сверл.

Ключевые слова: магнито-абразивная обработка, спиральные сверла, механика обработки

The mathematical model of kinematics of magnetically-abrasive treatment of disk milling cutters is before developed on rotor machine-tools with the magnetic system of type "circular bath". The researches conducted with its help allowed to set that at traditional correlations of sizes of constituents of total speed of cutting workings surfaces of teeth are in unfavorable conditions. The choice of certain sizes of rotor and "circular bath" and change of correlations of sizes of constituents of total speed of cutting is given by possibility to manage the sizes of corners of attack. The mathematical model of kinematics of magnetically-abrasive treatment of front surface of spiral drills is developed in this work.

Key words: magnetically-abrasive treatment, "circular bath", rotor machine-tools

Вступ. Раніше розроблена математична модель кінематики магнітно-абразивної обробки (МАО) дискових фрез на роторних верстатах із магнітною системою типу "кільцева ванна" [1] дозволила провести дослідження [2], у результаті яких визначені основні залежності розмірів ротора та магнітної системи верстата від кінематичних параметрів процесу обробки. Встановлено, що при традиційних співвідношеннях величин складових сумарної швидкості обробки передня та бокові поверхні зуба знаходяться в несприятливих умовах. Результати проведених досліджень дають змогу керувати величинами кутів атаки на поверхнях зубів фрези за рахунок вибору певних розмірів ротора і магнітної системи і варіювання складовими сумарної швидкості різання.

Більш складними за формою порівняно з дисковими фрезами є спіральні свердла. В роботах [3, 4] доведена перспективність застосування МАО для обробки кінцевих та осьових інструментів в якості фінішної викінчувальної або підготовчої під покриття обробки.

Рациональною схемою обробки цих інструментів є обробка в умовах великих робочих зазорів [3] на роторних верстатах із магнітною системою типу "кільцева ванна".

Мета роботи. Дослідження кінематики процесу МАО кінцевих та осьових інструментів на роторних верстатах із магнітною системою типу "кільцева ванна", розробка відповідної математичної моделі процесу кінематики.

Матеріал і результати досліджень. Перед опи-

сом математичної моделі кінематики процесу необхідно зробити такі попередні зауваження.

Кути атаки на поверхнях робочої частини свердла будемо визначати як кут між вектором сумарної швидкості різання та дотичними площинами до цих поверхонь.

Кути атаки будемо визначати на таких поверхнях: передній, задній, циліндричній поверхні прямої стрічки та додатковій гвинтовій поверхні стружкового рівчака. Сумарна швидкість різання будь-якої точки свердла при даній схемі МАО складається з двох складових: швидкість руху вздовж кільцевої ванни V_p (головний рух різання – $V_p \approx 5\div 10$ м/с), обертання навколо своєї вісі V_S

(рух кругової подачі – $V_S \approx (0,1\div 0,5) V_p$).

У технічній літературі приводяться відомості про форму різальної кромки, який вона має при заточці з кутом у плані ϕ [5]. В основному різальна кромка має форму відрізка прямої, який схрещується з віссю обертання. Далі виконується перерахунок профілю різальної кромки в торцевий переріз свердла, де на основі одержаного профілю отримують параметри профілю додаткової частини стружкового рівчака. При цьому додатковий профіль стружкового рівчака має в більшості випадків форму дуги кола, розміри та положення центра якого прив'язані до діаметрів свердла та його серцевини та отриманого профілю різальної кромки.

Тому при завданні додаткового профілю струж-

кового рiвчачка скористаємось традицiйною методикою, викладеною, наприклад, у [5]. Для завдання профiлю рiзальної кромки i гвинтової передньої поверхнi використаємо її у виглядi вiдрiзка прямої, тим бiльше, що нас цікавлять, у першу чергу, поверхнi свердла у зонi рiзальної кромки. Для опису профiлю в системi координат, зв'язанiй з вiссю "кiльцевої ванни", застосуємо математичний апарат перетворення координат, яким зручно користуватись у матричному виглядi.

Розрахункова схема. На рис. 1 показана схема установки оброблюваного свердла в робоче положення.

За вихiдне положення свердла прийемо його вертикальне положення з нижнiм розташуванням робочої частини. Початок O_1 системи координат $X_1Y_1Z_1$ розташований в центрi базового торцевого перерiзу свердла, в якому задається торцевий профiль стружкового рiвчачка свердла. Вiсь Z_1 направлена вiд торцевого перерiзу до хвостовика свердла. При цьому вiсь Y_1 направлена до вiсi магнiтної системи.

Для визначення координат гвинтових поверхонь свердла використовується система координат $X_2Y_2Z_2$ (рис. 1), яка повернута вiдносно системи координат $X_1Y_1Z_1$ на кут ζ та змiщена вiдносно неї на величину $H_Z = h \cdot z$, де $h = \frac{H_S}{2 \cdot p}$

ла, $H_S = \frac{p \cdot D}{\text{tg} w}$ - крок гвинтового рiвчачка, w - кут пiдймання гвинтової лiнii рiвчачка на периферiї свердла.

Для визначення координат свердла в його обертальному русi навколо власної вiсi з кутовою швидкiстю ω_S використовується система координат $X_3Y_3Z_3$, яка повернута вiдносно системи координат $X_2Y_2Z_2$ на кут ϕ .

Для обчислення координат точок свердла пiсля установки свердла у робоче положення, яке характеризується кутом нахилу ξ осi свердла вiдносно вертикалi, та додатковим установочним поворотом свердла на кут α для визначення координат свердла використовується система координат $X_4Y_4Z_4$, в якiй система координат $X_3Y_3Z_3$ повернута на кут ξ навколо осi Y_4 i на кут α навколо осi Z_4 . В загальному випадку вiсь повороту на кут α не спiвпадає з вiссю Z_4 . Але для спрощення обчислень прийемо, що вона спiвпадає з нею. Величини кутiв атаки χ в цьому випадку не залежать вiд положення осi повороту вiдносно осi Z_4 . Головне, щоб вони були паралельнi їй. Вiд розташування осi Z_4 залежить конструкцiя ротора та максимально можливий кут повороту α при заданих розмiрах "кiльцевої ванни" [1, 2].

Початок O_5 системи координат $X_5Y_5Z_5$ на вiсi "кiльцевої ванни" на вiдстанi $\frac{H_{PN}}{2}$ вiд нижнього або

верхнього торця кiльцевої ванни. Її вiсь Z_5 спiвпадає з вiссю "кiльцевої ванни" i направлена ввiрх. Напрямок вiсей X_5 та Y_5 вiдповiдає правилу правої руки для правих систем координат. Таке розташування систем координат вiдповiдає системам координат, прийнятiй для фрезерних верстатiв, оброблювальних центрiв фрезерно-розточувальної групи тощо.

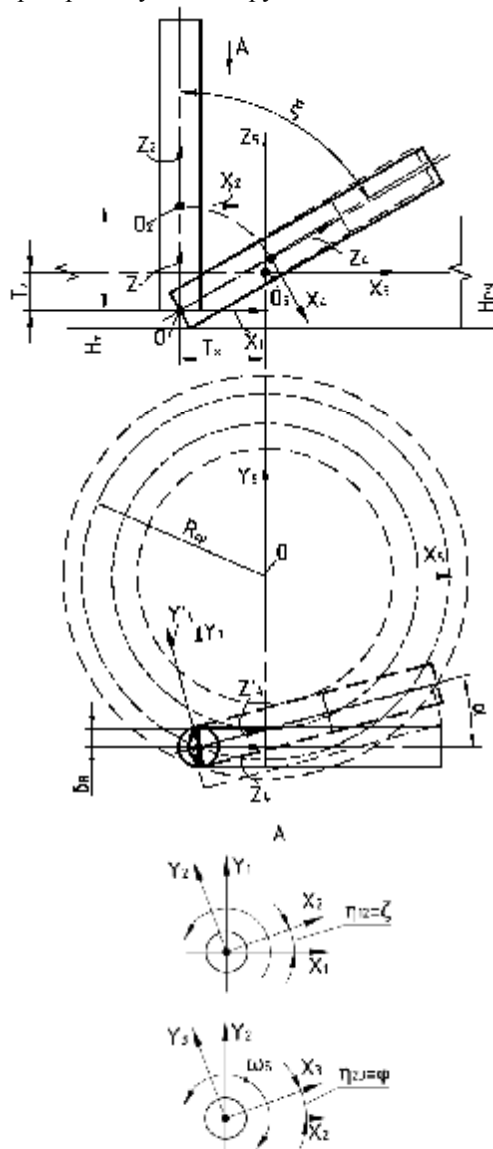


Рисунок 1 – Схема установки свердла в робоче положення в роторному верстатi та система координат

Зсув T_X, T_Z , системи координат $X_4Y_4Z_4$ вiдносно системи координат $X_5Y_5Z_5$ вибирається таким чином, щоб пiсля установки свердла у робоче положення, яке характеризується кутом нахилу ξ вiсi свердла вiдносно вертикалi, та кутом α повороту свердла вiдносно осi X_5 системи координат $X_5Y_5Z_5$, довжина L_P (рис. 2) робочої частини свердла дiлилась площиною Y_5Z_5 навпiл, а коло, яке описують зовнiшнi точки рiзальної кромки при обертаннi свердла дотикалось до нижньої площини "кiльцевої ванни".

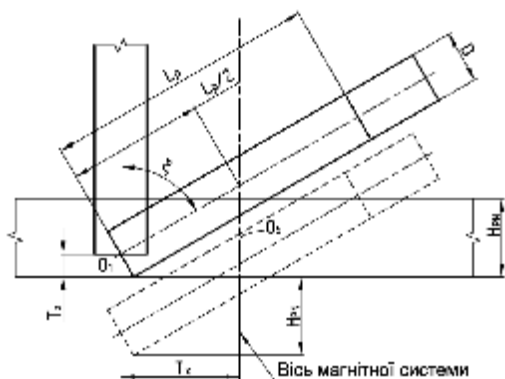


Рисунок 2 – До визначення параметрів робочого положення інструменту відносно магнітної системи

У цьому випадку величини зсуву визначаються за формулами:

$$T_X = \frac{L_p \cdot \sin(x)}{2}, \quad T_Z = \frac{H_{PN} - D \cdot \sin(x)}{2}, \quad (1)$$

де H_{PN} - висота полюсного наконечника, D - діаметр свердла.

Величина зсуву по вісі Y_5 $T_Y = R_{cp}$ визначається відстанню між осями робочих шпинделів ротора верстата, яка залежить, в основному, від таких параметрів, як максимальні розміри оброблюваних інструментів (у першу чергу довжина робочої частини та діаметр) і кількість робочих шпинделів. Величина R_{cp} є радіусом середньої лінії "кільцевої ванни".

Для рівномірної обробки робочих поверхонь на роторних верстатах із магнітною системою типу "кільцева ванна" кінцеві та осьові інструменти повинні здійснювати такі рухи:

- головний рух різання при обертанні ротора вздовж кільцевої ванни зі швидкістю V_P ;
- обертання свердла навколо своєї вісі зі швидкістю V_S .

Обертання інструменту навколо своєї вісі та обертання ротора в процесі магнітно-абразивної обробки є незалежними рухами.

Загальні засади визначення кутів атаки. Для знаходження кута атаки в заданих точках поверхонь інструменту визначимо координати цих точок у початковому положенні. Виконавши перетворення координат над цими координатами, одержимо координати точки в робочому зорі. Представимо вектори складових сумарної швидкості різання V_P та V_S як направлені відрізки в кінцевому положенні заданої точки, виходячи з таких положень:

- вектор швидкості V_P завжди перпендикулярний радіусу R_P , який дорівнює відстані від осі ротора (магнітної системи) до вибраної точки інструменту;

- вектор швидкості V_S завжди перпендикулярний радіусу R_S , який дорівнює відстані від осі інструменту до вибраної точки.

Склавши компоненти швидкостей V_P та V_S знайдемо компоненти сумарної швидкості різання V_{Σ} . Кутом атаки буде кут між вектором сумарної швидкості та дотичною до поверхні інструменту в заданій точці.

Визначення профілю стружкового рівчака спірального свердла. На рис. 3 представлена розрахункова схема стружкового рівчака [5].

Профіль різальної кромки. Рівняння різальної кромки в системі координат $X_1Y_1Z_1$ запишемо у вигляді вектора:

$$R_p = \begin{pmatrix} x_1 = R_x \cdot \cos m; \\ y_1 = -a; \\ z_1 = \left(\frac{D}{2} \cdot \cos m_D - R_x \cdot \cos m \right) \cdot \operatorname{tg}(90 - j_c) \end{pmatrix} \quad (2)$$

де R_x - радіус точки на різальній кромці свердла; $a = k_D \cdot \frac{D}{2}$ - радіус серцевини свердла; k_D - коефіцієнт радіусу серцевини свердла; кут $m = \arcsin\left(\frac{a}{R_x}\right)$; $m_D = \arcsin\left(\frac{2 \cdot a}{D}\right)$; j_c - кут при вершині свердла.

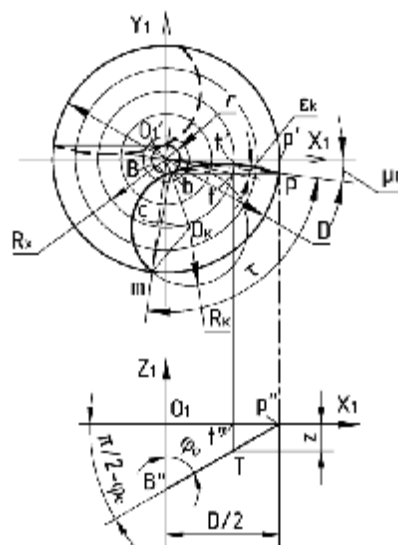


Рисунок 3 – Розрахункова схема стружкового рівчака

Коефіцієнт k_D згідно рекомендацій [5] можна вибрати із табл. 1.

Таблиця 1 – Залежність коефіцієнта k_D від діаметра свердла

D	0,25÷1,25	1,5÷12	12÷80
k_D	0,28÷0,2	0,19÷0,15	0,145÷0,125

Для того, щоб точка (2) різальної кромки з радіусом R_x перейти в торцевий переріз, вона повинна переміститись по осі Z_1 на величину $H_{Ze} = -h \cdot e_k$ і

повернутись на кут e_k . Тоді матриця переміщення MT_{Z1} уздовж осі Z_1 та матриця повороту MR_{Z1} точок робочої кромки на кут e_k при їх переміщенні будуть мати вигляд:

$$MT_Z = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -e_k \cdot h \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

$$MR_Z = \begin{pmatrix} \cos e_k & -\sin e_k & 0 & 0 \\ \sin e_k & \cos e_k & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Форма різальної кромки у торцевому перерізі:

$$R_{pze} = MT_Z \cdot MR_Z \cdot R_p. \quad (4)$$

Визначення профілю допоміжної частини стружкового ривчака. Допоміжна частина профілю задається згідно рекомендацій, викладених у [5]:

- його форма і розміри повинні забезпечити отримання необхідної ширини ривчака, що задається центральним кутом τ , плавне спряження допоміжної та основної частин профілю;

- при $R_X = D/2$ за формулою (4) знайдемо координати точки p :

$$x_p = \frac{D}{2} \cdot \cos m_D; \quad y_p = \frac{D}{2} \cdot \sin m_D; \quad z_p = 0; \quad (5)$$

- завдавши кут τ при $R_X = D/2$, знайдемо координати точки m :

$$\begin{aligned} x_m &= \frac{D}{2} \cdot \cos(m_D - \tau); \\ y_m &= \frac{D}{2} \cdot \sin(m_D - \tau); \\ z_m &= 0. \end{aligned} \quad (6)$$

- допоміжна частина профілю є дугою кола радіусом R_K .

Щоб це коло було дотичним до кола з радіусом a (до серцевини) та профілю кромки в точці b , його центр повинен лежати на лінії, що проходить через точки O_1 та b . З іншого боку, центр повинен лежати на лінії, перпендикулярній до відрізка bm , яка проходить через його середину – точку C .

Координати точки b дорівнюють:

$$x_b = R_{pze} x_a, \quad y_b = R_{pze} y_a, \quad z_b = R_{pze} z_a, \quad (7)$$

де $R_{pze} x_a$, $R_{pze} y_a$, $R_{pze} z_a$ - складові вектора R_{pze} при $R_X = a$.

Або у розгорнутому вигляді

$$\begin{aligned} x_b &= a \cdot \sin e_k + R_x \cdot \cos m \cdot \cos e_k; \\ y_b &= R_x \cdot \cos m \cdot \sin e_k - a \cdot \cos e_k; \\ z_b &= (90 - j_c) \cdot \left(R_x \cdot \cos m - \frac{D}{2} \cdot \cos m_D \right) - h \cdot e_k \end{aligned} \quad (8)$$

Координати точки C визначаються за наступними формулами:

$$x_C = \frac{x_b + x_m}{2}, \quad y_C = \frac{y_b + y_m}{2}, \quad z_C = 0. \quad (9)$$

Координати точки O_k будемо шукати як перетин двох прямих, що задані характеристичними рівняннями $A_1 x + B_1 y + C_1 = 0$ та $A_2 x + B_2 y + C_2 = 0$.

Рівняння прямої, яка проходить через точку C і перпендикулярна до відрізка bm завдамо спочатку у формі $y - y_C = k_{CO_K} (x - x_C)$, де $k_{CO_K} = -1/k_{bm}$ - її кутовий коефіцієнт, k_{bm} - кутовий коефіцієнт прямої, яка проходить через точки b і m .

У цьому випадку:

$$k_{bm} = \frac{y_m - y_b}{x_m - x_b},$$

$$A_1 = k_{CO_K}, \quad B_1 = -1, \quad C_1 = y_C - k_{CO_K} \cdot x_C.$$

Для знаходження коефіцієнтів характеристичного рівняння прямої, яка проходить через точки O і b , запишемо його спочатку у такому вигляді:

$$\frac{y - y_O}{y_O - y_b} = \frac{x - x_O}{x_O - x_b}, \quad (10)$$

де $x_O = 0$, $y_O = 0$. З урахуванням цього, рівняння (10) можна записати у вигляді $y_b \cdot x - x_b \cdot y + 0 = 0$. У цьому випадку $A_2 = y_b$, $B_2 = -x_b$, $C_2 = 0$.

Тоді центра O_k дуги стружкового ривчака:

$$x_{O_k} = \begin{pmatrix} B_1 & C_1 \\ B_2 & C_2 \\ A_1 & B_1 \\ A_2 & B_2 \end{pmatrix}, \quad y_{O_k} = \begin{pmatrix} C_1 & A_1 \\ C_2 & A_2 \\ A_1 & B_1 \\ A_2 & B_2 \end{pmatrix}, \quad z_{O_k} = 0. \quad (11)$$

Радіус дуги стружкового ривчака R_K :

$$R_K = \sqrt{(x_m - x_{O_k})^2 + (y_m - y_{O_k})^2}.$$

Рівняння стружкового ривчака завдамо в параметричній формі:

$$\begin{aligned} R_{rx} &= x_{O_k} + R_K \cdot \cos u; \\ R_{ry} &= y_{O_k} + R_K \cdot \sin u; \\ R_{rz} &= 0. \end{aligned} \quad (12)$$

При цьому кут v змінюється від u_b до u_m :

$$\begin{aligned} u_b &= 90^\circ + \arctg \left(\frac{x_b}{y_b} \right) \\ u_m &= 270^\circ - \arctg \left(\frac{x_m - x_{O_k}}{y_m - y_{O_k}} \right) \end{aligned} \quad (13)$$

Рівняння гвинтової передньої поверхні свердла. Рівняння гвинтової передньої поверхні свердла у системі координат $X_2 Y_2 Z_2$ можна представити у вигляді:

$$R_{p2} = \cdot MT_{Z21} \cdot MR_{Z21} \cdot R_p, \quad (14)$$

де MT_{Z21} , MR_{Z21} - матриці переміщення на величину $H_z = h \cdot z$ уздовж вісі свердла та матриця зв'язаного з ним повороту на кут ζ навколо вісі свердла.

Рівняння гвинтової передньої поверхні свердла у системі координат $X_5Y_5Z_5$ можна представити у вигляді:

$$R_{p5} = MT_{XYZ54} \cdot MR_{Y43} \cdot MR_{Z43} \cdot MR_{Z32} \cdot MT_{Z21} \cdot MR_{Z21} \cdot R_p, \quad (15)$$

де MR_{Z32} - матриця повороту на кут ϕ навколо вісі свердла (кругова подача свердла зі швидкістю w_S навколо своєї вісі); MR_{Y43} і MR_{Z43} - матриці повороту на кут ξ навколо вісі Y та додаткового повороту на кут α навколо вісі Z; MT_{XYZ54} - матриця переміщень на величини $-T_X$ по осі X, $-T_Y$ по осі Y та $-T_Z$ по осі Z.

Названі матриці мають такий вигляд:

$$MT_{Z21} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & x \cdot h \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (16)$$

$$MR_{Z21} = \begin{pmatrix} \cos z & -\sin z & 0 & 0 \\ \sin z & \cos z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (17)$$

$$MR_{Z32} = \begin{pmatrix} \cos j & -\sin j & 0 & 0 \\ \sin j & \cos j & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (18)$$

$$MR_{Y43} = \begin{pmatrix} \cos x & \sin x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin x & \cos x & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (19)$$

$$MR_{Z43} = \begin{pmatrix} \cos a & -\sin a & 0 & 0 \\ \sin a & \cos a & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (20)$$

$$MT_{XYZ54} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -T_X \\ 0 & 1 & 0 & -T_Y \\ 0 & 0 & 1 & -T_Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (21)$$

Для скорочення подальших записів матричних перетворень векторів позначимо деякі комбінації перетворень таким чином:

$$MRT_{5-1} \rightarrow MT_{XYZ54} \cdot MR_{Y43} \cdot MR_{Z43} \cdot MR_{Z32} \cdot MT_{Z21} \cdot MR_{Z21}$$

Визначення кутів атаки на передній поверхні свердла. Кут атаки на гвинтовій поверхні, утвореній рухом різальної кромки, визначимо за виразом:

$$c_p = 90^\circ - \arccos n_{Np}, \quad (22)$$

де n_{Np} - кут між нормаллю до дотичної площини до гвинтової поверхні в заданій точці.

Кут між нормаллю до дотичної площини визначимо зі скалярного добутку вектора нормалі $\dot{N}n_{pe}$ і сумарної швидкості різання $\dot{V}_{\Sigma p}$:

$$\cos n_{Np} = \frac{\dot{N}n_{pe} \cdot \dot{V}_{\Sigma p}}{|\dot{N}n_{pe}| \cdot |\dot{V}_{\Sigma p}|} \quad (23)$$

Вектор сумарної швидкості різання $\dot{V}_{\Sigma p}$ визначимо як

$$\dot{V}_{\Sigma p} = \dot{V}_p + \dot{V}_S. \quad (24)$$

Вектори складових знайдемо як векторні добутки відповідних векторів кутових швидкостей та радіусів-векторів точок гвинтової поверхні у відповідному русі.

При цьому необхідно мати на увазі, що вектори швидкостей та нормалей в нашому випадку потрібно розглядати як геометричні вектори (направлені відрізки), зв'язані вектори [6].

Вектор головного руху \dot{V}_p можна визначити за виразом:

$$\dot{V}_p = \dot{w}_p \times \dot{R}_{p5}, \quad (25)$$

де $\dot{R}_{p5} = MTR_{5-1} \cdot \dot{R}_p$ - радіус-вектор точки пове-

рхні в системі координат $X_5Y_5Z_5$; $\dot{w}_{p5} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ w_{p5} \end{pmatrix}$ -

вектор кутової швидкості свердла в обертальному русі навколо вісі "кільцевої ванни".

Вектор кругової подачі \dot{V}_{S2} у системі координат $X_1Y_1Z_1$ можна визначити за виразом

$$\dot{V}_{S2} = \dot{w}_S \times \dot{R}_{p2}, \quad (26)$$

де $\dot{w}_S = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ w_S \end{pmatrix}$ - вектор кутової швидкості сверд-

ла в обертальному русі навколо власної вісі.

Для знаходження вектора кругової подачі \dot{V}_{S5} у системі координат $X_5Y_5Z_5$ необхідно виконати перехід за допомогою відповідного перетворення координат. Але при цьому потрібно тимчасово до вектора-стовпчика з трьома рядками додати четвертий зі значенням 1. Після виконання координатних перетворень слід виконати зворотне перетворення вектора із чотирьохкомпонентного в трьохкомпонентний, відкинувши рядок із 1. Тоді вектор швидкості кругової подачі в системі координат $X_5Y_5Z_5$ знайдемо за виразом:

$$[\dot{V}_{S5}]^4 = MTR_{5-1} \cdot [\dot{w}_S \times \dot{R}_p]^4 - MTR_{5-1} \cdot [\dot{R}_p]^4, \quad (27)$$

де квадратні дужки з верхнім індексом 4 біля вектора означають його тимчасову чотирьохкомпонентну форму. Вектор нормалі до гвинтової поверхні можна знайти двома способами:

1. Подібно до вектора кругової подачі, знайдемо вектор нормалі у системі координат $X_2Y_2Z_2$ за виразом:

$$N_{v_2} = \begin{pmatrix} \frac{\partial R_{p2X}}{\partial R_x} \\ \frac{\partial R_{p2Y}}{\partial R_x} \\ \frac{\partial R_{p2Z}}{\partial R_x} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \frac{\partial R_{p2X}}{\partial z} \\ \frac{\partial R_{p2Y}}{\partial z} \\ \frac{\partial R_{p2Z}}{\partial z} \end{pmatrix}, \quad (28)$$

де $\frac{\partial R_{p2X}}{\partial R_x}$, $\frac{\partial R_{p2Y}}{\partial R_x}$, $\frac{\partial R_{p2Z}}{\partial R_x}$ - часткові похідні складових вектора гвинтової поверхні в системі координат $X_2Y_2Z_2$ за параметром R_x ; $\frac{\partial R_{p2X}}{\partial z}$, $\frac{\partial R_{p2Y}}{\partial z}$, $\frac{\partial R_{p2Z}}{\partial z}$ - часткові похідні складових вектора гвинтової поверхні в системі координат $X_2Y_2Z_2$ за параметром z ; R_{p2} знаходимо за виразом (28).

Після цього виконати перехід до системи координат $X_5Y_5Z_5$:

$$[N_{v_5}]^4 = MTR_{5-2} \cdot [N_{v_2}]^4 - MTR_{5-1} \cdot [R_p]^4, \quad (29)$$

2. Визначити рівняння нормалі до гвинтової поверхні в системі координат $X_5Y_5Z_5$ за виразом:

$$N_{v_5} = \begin{pmatrix} \frac{\partial R_{p5X}}{\partial R_x} \\ \frac{\partial R_{p5Y}}{\partial R_x} \\ \frac{\partial R_{p5Z}}{\partial R_x} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \frac{\partial R_{p5X}}{\partial z} \\ \frac{\partial R_{p5Y}}{\partial z} \\ \frac{\partial R_{p5Z}}{\partial z} \end{pmatrix}, \quad (30)$$

де складові векторного добутку є частковими похідними вектора R_{p5} гвинтової поверхні в системі координат $X_5Y_5Z_5$ за параметрами R_x та z .

Визначення кутів атаки на гвинтовій поверхні допоміжної частини стружкового рівчака свердла. Рівняння гвинтової поверхні допоміжної частини стружкового рівчака R_{r2} у системі координат $X_2Y_2Z_2$ можна визначити за залежністю (14), а у системі координат $X_5Y_5Z_5$ R_{r5} - за формулою (15), підставивши в них замість R_p вектор-стовпчик R_r із виразу (12).

Далі кут атаки c_r визначається за виразами, аналогічними виразам (22)-(30), в яких замість вектора-стовпчика гвинтової передньої поверхні підставляється вектор-стовпчик гвинтової допоміжної поверхні стружкового рівчака. В результаті отримаємо складові V_{pr} та V_{sr} сумарної швидкості V_{sr} точок допоміжної поверхні стружкового рівчака, вектори нормалі Nn_{r2} , Nn_{r5} до неї в системах координат $X_2Y_2Z_2$ та $X_5Y_5Z_5$ і через них – кути атаки c_r . Крім сказаного, слід зауважити, що для отримання вектора нормалі в цьому випадку в першому члені (вектору-стовпчику) векторного добутку за (28) і (30) необхідно брати часткову похідну за параметром u ,

тобто вирази для обчислення векторів нормалей до допоміжної гвинтової поверхні рівчака мають вигляд:

$$N_{v_2} = \begin{pmatrix} \frac{\partial R_{r2X}}{\partial u} \\ \frac{\partial R_{r2Y}}{\partial u} \\ \frac{\partial R_{r2Z}}{\partial u} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \frac{\partial R_{r2X}}{\partial z} \\ \frac{\partial R_{r2Y}}{\partial z} \\ \frac{\partial R_{r2Z}}{\partial z} \end{pmatrix}, \quad (31)$$

$$N_{v_5} = \begin{pmatrix} \frac{\partial R_{r5X}}{\partial u} \\ \frac{\partial R_{r5Y}}{\partial u} \\ \frac{\partial R_{r5Z}}{\partial u} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \frac{\partial R_{r5X}}{\partial z} \\ \frac{\partial R_{r5Y}}{\partial z} \\ \frac{\partial R_{r5Z}}{\partial z} \end{pmatrix}. \quad (32)$$

Узагалі рівняння стружкового рівчака в параметричній формі можна було б виразити і через параметр u , але в цьому випадку вирази для обчислення координат точок, швидкостей, нормалей та кутів атаки будуть набагато складнішими.

Адекватність розробленої математичної моделі кінематики МАО спіральних свердел на роторному верстаті перевірялась співставленням результатів розрахунків і результатами твердотільного параметричного моделювання в САПР Inventor фірми Autodesk при таких вихідних даних: $D = 20$ мм, $a = 0,15$ мм, $w_c = 30^\circ$, $j_c = 120^\circ$, $w_p = 25$ с⁻¹, $w_s = 50$ с⁻¹.

Висновки. Основними задачами подальших досліджень кінематики МАО спіральних свердел на роторному верстаті з використанням розробленої моделі є:

- дослідження впливу розмірних параметрів свердел, основних розмірів верстата та складових сумарної швидкості різання на кути атаки на різних поверхнях робочої частини свердел;
- аналіз результатів досліджень і на їх основі розробка рекомендацій з призначення величин окремих складових сумарної швидкості різання;
- розробка методики визначення основних розмірів ротора та магнітної системи верстата.

ЛІТЕРАТУРА

1. Гейчук В.М., Шевчук В.А., Гаврушкевич А.Ю. Верстати для магнітно-абразивної обробки на базі магнітної системи типу "кільцева ванна": кінематика обробки дискових фрез//Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Машинобудування. – 2006. - Вип. 48. С. 121-131.
2. Гейчук В.М. Верстати для магнітно-абразивної обробки на базі магнітної системи типу "кільцева ванна": аналіз кінематики обробки дискових фрез//Научно-технический журнал "Технологические системы" ВАТ "Український науково-дослідний інститут авіаційних технологій", Київ. – 2007. – Вип. № 2(38). – С. 33-42.

Стаття надійшла 05.05.2008 р.
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.
Саленком О.Ф.