

## ВИЗНАЧЕННЯ КІНЕМАТИЧНИХ ЗАДНІХ КУТІВ ПРИ НАРІЗУВАННІ ВНУТРІШНІХ РІЗЬБ ГОЛОВКАМИ

*Определение кинематических задних углов при нарезании внутренних резьб головками.*

*Получены формулы для определения кинематических задних углов на режущей и калибрующей частях гребенок в зависимости от конструктивных параметров головки и параметров заточки гребенок. Проанализировано влияние этих факторов на задние углы. Приведены рекомендации, позволяющие повысить качество резьб.*

*Determination of kinematic back corners of the cutting internal threads heads.*

*Formulas for definition of kinematic back corners on cutting and calibrating parts of combs are received depending on design data of the head and parameters of sharpening of combs. Influence of these factors on back corners is analysed. The recommendations are resulted, allowing to raise{increase} quality of grooves.*

У машинобудуванні виникають певні труднощі при виготовленні крупних внутрішніх різьб, особливо діаметром понад 130 мм. Такі різьби можна нарізувати спеціальними різьбонарізними головками з круглими гребінками [1].

При нарізуванні крупних внутрішніх різьб головками з круглими гребінками [1] протікання процесу різання і якість нарізаних різьб суттєво залежать від кінематичних задніх кутів на головних і допоміжних лезах різальних  $\alpha_3$  і калібруючі  $\alpha_k$  зубів гребінок. Оптимальні значення цих кутів залежать від фізико-механічних властивостей матеріалу виробів і інструмента, режимів різання, мастильно-охолодної рідини та інших факторів і визначаються експериментально.

Мета роботи – визначення впливу конструктивних параметрів головок і параметрів заточки гребінок на кінематичні задні кути, аналіз конкретних значень цих кутів і розробка відповідних рекомендацій щодо поліпшення процесу різьбонарізання.

При заточуванні гребінок, установлених на кулачках, видержується певне перевищення  $z_A$  точки  $A$ , передній кут  $\gamma_0$  та кут нахилу  $\lambda_0$  головного леза на калібруючій частині гребінки [1]. Ці геометричні параметри заточування гребінок не дозволяють прямо проаналізувати, як залежить процес зрізування стружки від фактичних значень задніх кутів при різанні, проте можна знайти формули для визначення задніх кутів у залежності від значень  $z_A$ ,  $\gamma_0$  та  $\lambda_0$ .

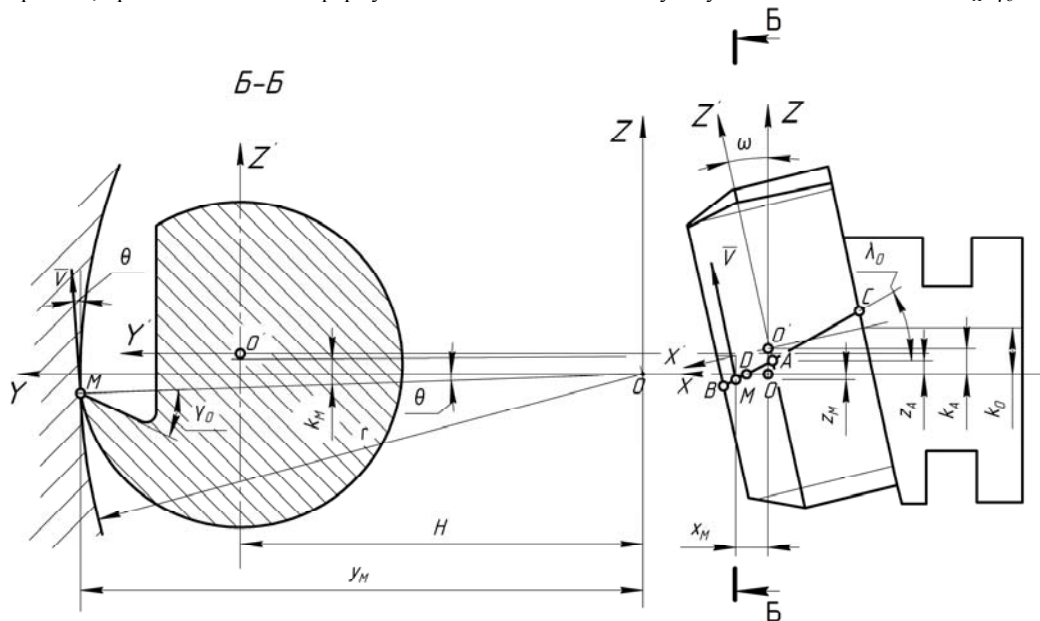


Рис. 1. Схема для визначення рівняння вектора швидкості

Щоб простежити за зміною кінематичних задніх кутів по всій довжині головного різального леза (рис.1), визначимо їх в базових точках  $A, B, C$  та  $D$  ( точка  $D$  знаходиться посередині між точками  $A$  та  $B$  ). При цьому для

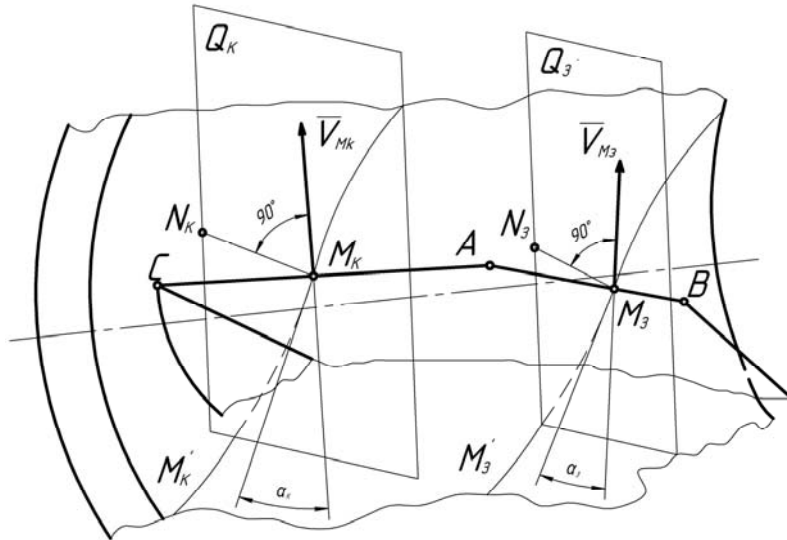


Рис. 2. Схема для визначення задніх кутів  $\alpha_k$  та  $\alpha_z$

площині  $Q_z$  ( $Q_k$ ) відносного руху.

Траєкторія відносного руху довільної точки  $M$  (рис.1) на лезі гребінки представляє собою гвинтову лінію, яка описується рівняннями

$$x = \frac{S}{2\pi} \theta; y = r \cos \theta; z = r \sin \theta, \quad (1)$$

звідки

$$\frac{dx}{d\theta} = \frac{S}{2\pi}; \frac{dy}{d\theta} = -r \sin \theta; \frac{dz}{d\theta} = r \cos \theta, \quad (2)$$

або

$$\frac{dx}{d\theta} = \frac{S}{2\pi}; \frac{dy}{d\theta} = -z; \frac{dz}{d\theta} = y. \quad (3)$$

Рівняння дотичної до траєкторії руху [3], тобто вектора відносної швидкості для точки  $M(x_M, y_M, z_M)$ , можна записати у вигляді

$$\frac{x - x_M}{S/2\pi} = \frac{y - y_M}{-r \sin \theta} = \frac{z - z_M}{r \cos \theta}. \quad (4)$$

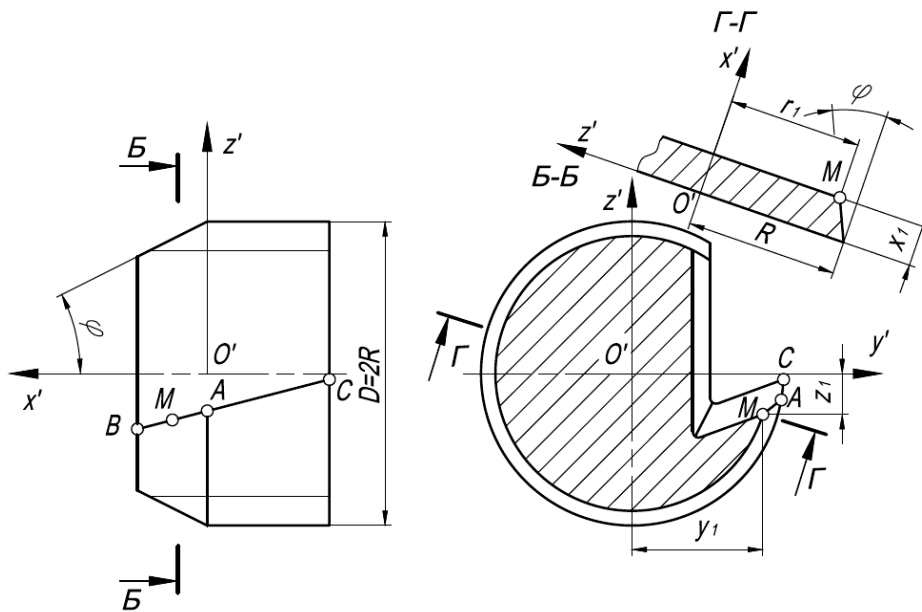


Рис. 3. Схема для виводу рівняння забірного конуса гребінки

Введемо наступні позначення:

$$l_2 = \frac{S}{2\pi}; m_2 = -r \sin \theta = -z; n_2 = r \cos \theta = y. \quad (5)$$

спрощення розрахунків і можливості застосування результатів дослідження до всіх гребінок комплексу умовно вважаємо, що головне лезо гребінки  $CADB$  суцільне, тобто воно не розділене западинами витків. Як видно з рис.1, базові точки  $ADB$  знаходяться на різальній конічній частині гребінки, а  $A$  та  $C$  – на калібруючій циліндричній частині. Тому задні кути в базових точках визначаємо окремо, виходячи з відповідних умов.

Задній кут [2] – це кут між дотичною до траєкторії руху досліджуваної точки  $M_z$  ( $M_k$ ), тобто вектором відносної швидкості  $\vec{V}$  (рис.2), та дотичною до задньої поверхні гребінки  $M_zM_z'$  ( $M_kM_k'$ ), замірений в

Визначимо рівняння дотичної до кривої перетину задньої поверхні забірного конуса гребінки з площиною відносного руху. Рівняння забірного конуса гребінки в системі координат  $X'Y'Z'$  (рис.3) має вигляд

$$y_1^2 + z_1^2 = r_1^2 = (R - x_1 \operatorname{tg} \varphi)^2, \quad (6)$$

де індексом 1 позначені координати в системі  $X'Y'Z'$  з центром  $O'$  в основі забірного конуса гребінки, яка повернута на кут  $\omega$  скосу кулачка відносно системи  $XYZ$ , а без індексу – в системі  $XYZ$  з центром  $O$ , що знаходиться на осі деталі в площині, яка проходить через базову точку  $A$  (рис.1).

Перейти від системи  $X'Y'Z'$  до системи  $XYZ$  можна за формулами

$$y_1 = y + H; x_1 = x \cos \omega - z \sin \omega; z_1 = x \sin \omega + z \cos \omega - k_A. \quad (7)$$

На основі залежностей (6) та (7), рівняння поверхні забірного конуса  $\Phi(x, y, z)$  в системі  $XYZ$  остаточно приймає наступний вигляд:

$$(y - H)^2 + (x \sin \omega + z \cos \omega - k_A)^2 - R^2 + 2R \operatorname{tg} \varphi (x \cos \omega - z \sin \omega) - \operatorname{tg}^2 \varphi (x \cos \omega - z \sin \omega)^2 = 0. \quad (8)$$

Під площиною  $Q_3$  ( $Q_k$ ) відносного руху (рис. 2) слід розуміти площину [2], що проходить через дотичну до траєкторії відносного руху досліджуваної точки  $M_3$  ( $M_k$ ) різальної кромки, тобто вектор відносної швидкості різання, та головну нормаль до цієї траєкторії  $M_3 N_3$  ( $M_k N_k$ ). Положення цієї площини залежить тільки від траєкторії відносного руху точки різальної кромки.

З диференціальної геометрії відомо [3, 4], що площина, яка проходить через дотичну до траєкторії та головну нормаль, є стичною. Якщо траєкторія руху досліджуваної точки  $M(x_M, y_M, z_M)$  задана в параметричній формі  $x=x(t)$ ,  $y=y(t)$  та  $z=z(t)$ , то рівняння стичної площини для прийнятої системи координат можна записати таким чином:

$$\begin{vmatrix} x - x_M & y - y_M & z - z_M \\ x' & y' & z' \\ x'' & y'' & z'' \end{vmatrix} = 0. \quad (9)$$

З рівнянь (9) та (1) після деяких перетворень рівняння площини відносного руху  $F(x, y, z)$  приймає вид

$$rx + \frac{S}{2\pi} y \sin \theta - \frac{S}{2\pi} z \cos \theta = 0. \quad (10)$$

Задня поверхня забірного конуса гребінки при перетині з площиною відносного руху точки  $M_3$  (рис. 2) утворює просторову криву  $M_3 M_3'$ , що задається рівняннями (8) та (10). Рівнянням дотичної в точці  $M$  до просторової кривої, заданої рівняннями двох поверхонь  $F(x, y, z) = 0$  та  $\Phi(x, y, z) = 0$ , буде [3, 4]

$$\frac{x - x_M}{l_1} = \frac{y - y_M}{m_1} = \frac{z - z_M}{n_1}, \quad (11)$$

$$l_1 = \frac{\left| \frac{dF}{dy} \frac{dF}{dz} \right|}{\left| \frac{dF}{dy} \frac{dF}{dz} \right|}; m_1 = \frac{\left| \frac{dF}{dz} \frac{dF}{dx} \right|}{\left| \frac{dF}{dz} \frac{dF}{dx} \right|}; n_1 = \frac{\left| \frac{dF}{dx} \frac{dF}{dy} \right|}{\left| \frac{dF}{dx} \frac{dF}{dy} \right|}.$$

Знайшовши частинні похідні від змінних рівняння (8) поверхні забірного конуса  $\Phi(x, y, z) = 0$  та (10) площини відносного руху  $F(x, y, z) = 0$ , та визначників (11) отримаємо значення направляючих коефіцієнтів дотичної до сліду перетину задньої поверхні забірного конуса з площиною відносного руху в точці  $M_3(x, y, z)$ :

$$\begin{aligned} l_1 &= \frac{Sz}{\pi} (x \sin \omega + z \cos \omega - k_A) \cos \omega - \frac{SRz}{\pi} \operatorname{tg} \varphi \sin \omega + \frac{Sz}{\pi} \operatorname{tg}^2 \varphi (x \cos \omega - z \sin \omega) \sin \omega + \frac{Sy}{\pi} (y - H); \\ m_1 &= \left( -\frac{Sy}{\pi} \sin \omega - 2r^2 \cos \omega \right) (x \sin \omega + z \cos \omega - k_A) + \\ &+ \left( \frac{Sy}{\pi} \operatorname{tg}^2 \varphi \cos \omega - 2r^2 \operatorname{tg}^2 \varphi \sin \omega \right) (x \cos \omega - z \sin \omega) + R \operatorname{tg} \varphi \left( 2r^2 \sin \omega - \frac{Sy}{\pi} \cos \omega \right); \\ n_1 &= 2r^2 (y - H) - \frac{Sz}{\pi} (x \sin \omega + z \cos \omega - k_A) \sin \omega - \frac{SRz}{\pi} \operatorname{tg} \varphi \cos \omega + \frac{Sz}{\pi} \operatorname{tg}^2 \varphi (x \cos \omega - z \sin \omega) \cos \omega. \end{aligned} \quad (12)$$

На основі залежностей (5) та (12) знаходимо головний задній кут на забірному конусі в площині відносного руху

$$\cos \alpha_3 = \frac{\frac{S}{2\pi} l_1 - z m_1 + y n_1}{\pm \sqrt{\left( l_1^2 + m_1^2 + n_1^2 \right) \left[ z^2 + y^2 + \left( \frac{S}{2\pi} \right)^2 \right]}}. \quad (13)$$

При визначенні знаку заднього кута зазора виходимо з наступного: якщо перевищення досліджуваної точки вище від перевищення, при якому задній кут дорівнює нулеві [1], то розрахунковий задній кут  $\alpha_3$  – від'ємний, тобто порушуються умови нормального різання, якщо ж це перевищення нижче, то він додатний.

Аналогічно вираховуємо задній кут  $\alpha_k$  зазора на калібруючій частині  $AC$  гребінки (рис.1 та 2). Рівнянням циліндричної калібруючої поверхні гребінки в системі координат  $X'Y'Z'$  буде

$$z_1^2 + y_1^2 = R^2. \quad (14)$$

У системі  $XYZ$ , згідно з формулами (7), отримуємо рівняння калібруючої частини гребінки  $\Phi_1(x, y, z) = 0$  у вигляді

$$\left(x \sin \omega + z \cos \omega - k_A\right)^2 + (y - H)^2 - R^2 = 0. \quad (15)$$

Визначивши частинні похідні від змінних рівнянь (15) та (10), калібруючої частини гребінки і площини відносного руху, за допомогою визначників (11) знайдемо направляючі коефіцієнти дотичної до сліду перетину  $M_k$   $M_k'$  (рис. 2) калібруючої частини гребінки з площиною відносного руху досліджуваної точки  $M_k(x, y, z)$ :

$$\begin{aligned} l_3 &= \frac{Sz}{\pi}(x \sin \omega + z \cos \omega - k_A) \cos \omega + \frac{Sy}{\pi(y - H)}; \\ m_3 &= \frac{-Sy}{\pi}(x \sin \omega + z \cos \omega - k_A) \sin \omega - 2r^2(x \sin \omega - z \cos \omega - k_A) \cos \omega; \\ n_3 &= 2r^2(y - H) - \frac{Sz}{\pi}(x \sin \omega + z \cos \omega - k_A) \sin \omega. \end{aligned} \quad (16)$$

задній кут на калібруючій частині гребінки в площині відносного руху визначається та вираховується на основі формул (5) та (16):

$$\cos \alpha_k = \frac{\frac{S}{2\pi} l_3 - z m_3 + y n_3}{\sqrt{\left(l_3^2 + m_3^2 + n_3^2\right) z^2 + y^2 + \left(\frac{S}{2\pi}\right)^2}}. \quad (17)$$

Знак кута  $\alpha_k$  визначається так само, як і кута  $\alpha_3$ .

Для визначення впливу геометричних параметрів заточки гребінок  $z_A$ ,  $\gamma_0$  та  $\lambda_0$  на задні кути  $\alpha_3$  на різальній частині, за отриманими формулами розраховані конкретні значення цих кутів для головки, описаної в [1]. При цьому координати базових точок для прийнятої системи координат визначались за формулами, наведеними в таблиці.

Попередні розрахунки показали, що на відміну від нарізування зовнішніх різьб головками типу К та КА, при нарізуванні внутрішніх різьб, внаслідок внутрішнього дотику, великої різниці між діаметрами гребінок та нарізуваної різьби і малих кутів підйому гвинтової лінії, суттєво зменшується вплив параметрів заточки гребінок на задні кути та протікання процесу різання. Тому для внутрішніх різьб межі зміни  $z_A$  зростають, у порівнянні з зовнішніми різьбами, від 0,4 – 0,6 до 2 – 4 мм.

Таблиця

**Формули для визначення координат базових точок**

Точка	Координати		
	$x$	$y$	$z$
$A$	$x_A = 0$	$y_A = -r_1 = H + R$	$z_A = z_A$
$B$	$x_B = l_3 \cos \omega$	$y_B = -r_1 - l_3 \cos \omega \operatorname{tg} \varphi_3$	$z_B = z_A - l_3 \cos \omega (\operatorname{tg} \lambda_0 + \operatorname{tg} \varphi_3 \operatorname{tg} \gamma_0)$
$C$	$x_C = -l_k \cos \omega$	$y_C = -r_1 - r_2 - h_1$	$z_C = z_A + l_k \cos \omega \operatorname{tg} \lambda_0$
$D$	$x_D = 0,5 l_3 \cos \omega$	$y_D = -r_1 - 0,5 l_3 \cos \omega \operatorname{tg} \varphi_3$	$z_D = z_A - 0,5 l_3 \cos \omega (\operatorname{tg} \lambda_0 + \operatorname{tg} \varphi_3 \operatorname{tg} \gamma_0)$

Проте, найбільше на значення задніх кутів впливає конструктивний параметр  $\kappa_0$  (рис.1), величину якого можна розрахувати [1]. Наприклад, збільшення  $\kappa_0$  від 2 до 5 мм дозволяє, в основному, збільшити  $\alpha_3$  від 0 – 3 до 10 – 11° при однакових параметрах заточки гребінок.

На рис.4 наведені криві дуже великого радіуса (практично це прямі лінії) залежності задніх кутів  $\alpha_3$  від параметрів заточки гребінок для таких умов: різьба – М 135х2;  $\kappa_0 = 3$  мм; діаметр гребінки  $D = 38,8$  мм;  $d = 135$  мм;  $z_A = 2, 3$  і 4 мм;  $\gamma_0 = 0, 10$  і 20°;  $\lambda_0 = 2, 5$  і 8°. Параметри заточки  $z_A$ ,  $\gamma_0$  та  $\lambda_0$  змінювались в межах, при яких забезпечується нормальне протікання процесу різання [1].

З рис.4 та розрахункових таблиць (в роботі не наведені) видно, що задній кут  $\alpha_3$ , максимальний в точці  $B$ , може змінюватись від 7° 33' ( $z_A = 2$  мм,  $\gamma_0 = 20^\circ$ ,  $\lambda_0 = 8^\circ$ ) до 48° ( $z_A = 4$  мм,  $\gamma_0 = 0^\circ$ ,  $\lambda_0 = 2^\circ$ ). Розрахункові значення заднього кута  $\alpha_3$  в точці  $A$  змінюються від 0° ( $z_A = 4$  мм) до 4° 30' ( $z_A = 2$  мм) і не залежать від кутів  $\gamma_0$  та  $\lambda_0$ . Така велика зміна задніх кутів по довжині різальної кромки обумовлює різні умови різання в досліджуваних точках.

Задні кути  $\alpha_3$ , які залежать в точці  $A$  тільки від перевищення  $z_A$ , поступово зростають в міру наближення досліджуваної точки до переднього торця гребінки. При цьому задні кути зростають тим швидше, чим більші кути заточки  $\gamma_0$  та  $\lambda_0$ . У випадку зміни  $\lambda_0$  від 2 до 8° задні кути в точці  $B$  збільшуються приблизно на 1° при різних значеннях  $z_A$  та  $\gamma_0$ .

Зі зростанням переднього кута заточки  $\gamma_0$  від 0 до 20° точка  $B$ , що розміщена на передньому торці забірного конуса, знижується, а задні кути  $\alpha_3$  в цій точці збільшуються приблизно на 1° – 1°30'. При зміні перевищення  $z_A$  від 2 до 4 мм, задні кути в точці  $B$  зменшуються приблизно на 4 – 5° для різних значень  $\gamma_0$  та  $\lambda_0$ .

Таким чином, в розглянутих межах найбільше на задні кути в точці  $B$  впливає перевищення  $z_A$ , а в меншій мірі кути заточки  $\gamma_0$  та  $\lambda_0$ . В міру наближення до базової точки  $A$  вплив цих кутів на  $\alpha_3$  зменшується і в самій точці  $A$  зводиться до нуля, але вплив перевищення  $z_A$  тут досить значний.

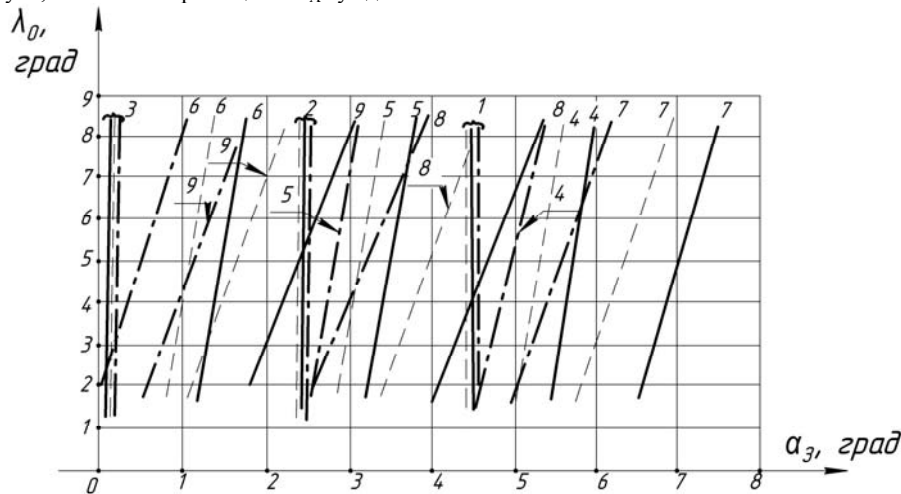


Рис. 4. Графіки залежності задніх кутів  $\alpha_3$  на різальній частині гребінки від кута нахилу різальної кромки  $\lambda_0$  при передніх кутах заточки  $\gamma_0$ , що дорівнюють  $0,10$  та  $20^\circ$  (відповідно штрих-пунктирні, штрихові та суцільні лінії) для точок різальної кромки A(1-3), B(7-9) та D(4-6) при  $z_A$ , мм: 1,4,7 – 2; 2,5,8 – 3; 3,6,9 – 4

Установлено, що для нормального протікання процесу різьбонарізання необхідно, щоб перехід фактичних додатних значень задніх кутів на головній різальній кромці до від'ємних проходив у точці  $A$  або поблизу неї зі сторони опорного торця гребінки [1]. Тоді різальна частина гребінки буде зрізувати стружку, формуючи западини витків різьби, а калібруюча – калібрувати їх, забезпечуючи режим самозатягування без підрізування профілю витків.

У зв'язку з тим, що на задні кути в точці  $A$  впливає тільки перевищення  $z_A$ , то воно головним чином і впливає на якість різьби і оптимізацію процесів різьбоформування.

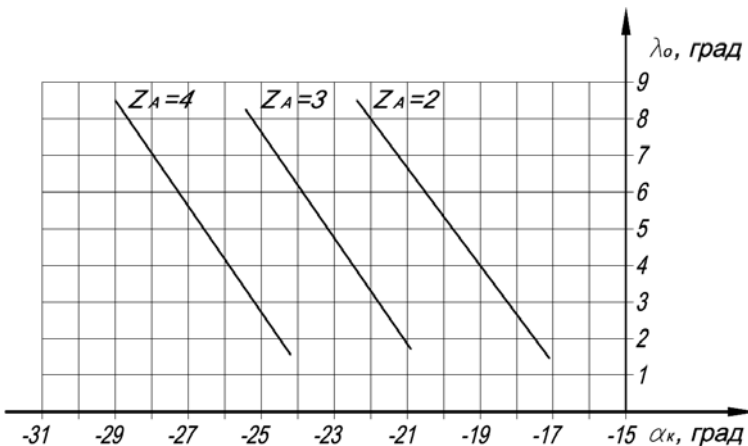


Рис. 5. Графіки залежності задніх кутів  $\alpha_x$  на калібруючій частині гребінки в точці  $C$  від кута нахилу різальної кромки  $\lambda_0$  та перевищення  $z_A$ , мм

Аналіз задніх кутів у найбільш навантаженій частині гребінки (зона точки  $D$ ) показує, що при збільшенні значення  $\lambda_0$  від  $2$  до  $8^\circ$  кут  $\alpha_3$  зростає тільки на  $0,5^\circ$ ; у випадку зміни кута  $\gamma_0$  від  $0$  до  $20^\circ$  задні кути збільшуються на  $0,5 - 1^\circ$ ; при зростанні  $z_A$  від  $2$  до  $4$  мм задні кути зменшуються приблизно на  $4-5^\circ$ .

Розрахункові значення задніх кутів  $\alpha_x$  на калібруючій частині гребінки в точці  $C$  для прийнятих параметрів заточки гребінок знаходились в межах від  $-17^\circ 36'$  до  $-28^\circ 43'$  (рис.5), що дозволяє забезпечити надійне самозатягування головки в процесі роботи.

Необхідно відмітити, що при нарізуванні внутрішніх різьб суттєво збільшуються дуги контакту гребінок з

оброблюваною заготовкою у порівнянні з нарізуванням зовнішніх різьб, що поліпшує самозатягування головок і зменшує ймовірність підрізування профілю витків різьби. Разом з тим різко зменшуються кути підйому гвинтової лінії, що затруднює надійне і легке врізання головки в заготовку. Тому при нарізуванні крупних внутрішніх різьб більш перспективним є нарізування з примусовою подачею головки на крок нарізуваної різьби ніж при нарізуванні зовнішніх різьб.

#### Висновки.

1. Показана важливість значень кінематичних задніх кутів для протікання процесу різьбонарізання головками.
2. Отримані формули для визначення кінематичних задніх кутів на різальній і калібруючій частинах гребінок у залежності від конструктивних параметрів головки та параметрів заточки гребінок.
3. Проаналізовано вплив різних факторів на значення задніх кутів.
4. Наведені рекомендації, які дозволяють поліпшити процес нарізування внутрішніх різьб головками.

#### Список літератури.

1. Добрянський С.С. Нарізування крупних внутрішніх різьб різьбонарізними головками. Вестник НТТУ "КПИ". Машиностроение. №58. – К.:НТУУ "КПИ". – 2010.
2. Шевченко Н.А. Геометрические параметры режущей кромки инструмента и сечение среза. М., Машгиз, 1957. 139 с.
3. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. М., Наука, 1974. 831 с.
4. Рашевский П.К. Курс дифференциальной геометрии. М., ГИТТЛ, 1950. 428 с.