

Гейчук В.М.

НТУУ "Київський політехнічний інститут". Україна, Київ

## ВЕРСТАТИ ДЛЯ МАГНІТНО-АБРАЗИВНОЇ ОБРОБКИ НА БАЗІ МАГНІТНОЇ СИСТЕМИ ТИПУ "КІЛЬЦЕВА ВАННА": АНАЛІЗ КІНЕМАТИКИ ОБРОБКИ ДИСКОВИХ ФРЕЗ

### Анотація

Розроблена математична модель кінематики обробки дискових фрез дозволила провести дослідження, в 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 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 складових сумарної швидкості різання.

### Abstract

The developed mathematical model of kinematics of treatment of disks milling cutters allowed to conduct researches as a result of which certain basic dependences of sizes of rotor and magnetic system of machine-tool are on the kinematics parameters of process of treatment. It is define that at traditional correlations of sizes of constituents of total speed of treatment front and the lateral surfaces of tooth are unfavorable terms. The results of the conducted researches enable to manage the sizes of corners of attack on the surfaces of teeth of milling cutter due to the choice of certain sizes of rotor and magnetic system and varying of constituents of total cutting speed.

### Постановка проблеми та аналіз попередніх досліджень

Для дослідження кінематики процесу МАО дискових фрез та пил було розроблено математичну модель процесу кінематики на роторних верстатах на основі магнітної системи типу "кільцева ванна" [1].

### Мета роботи

Тому метою роботи є:

- визначення залежностей основних розмірів магнітної системи та ротора верстата від розмірних параметрів дискових фрез та кінематичних параметрів процесу обробки;

- дослідження впливу розмірних параметрів дискових фрез, основних розмірів верстата та складових сумарної швидкості руху фрези на кути атаки на різних поверхнях зуба фрези.

### Результати виконаних досліджень

Визначення основних розмірів магнітної системи та ротора верстата

Визначення розмірів полюсних наконечників

При аналізі залежностей величин радіусів робочих поверхонь зовнішнього  $R_{zn}$  та внутрішнього  $R_{вн}$  полюсних наконечників від кута коливання  $\alpha$  (рис. 1), які визначаються за формулами (19) та (24) [1], встановлено, що залежність  $R_{zn} = f(\alpha)$  має точку максимуму.

Визначимо значення кута коливання, при якому  $R_{zn}$  буде максимальним. Для цього знайдемо максимум підкорінного виразу (24) [1]. Прирівняємо похідну цього виразу по куту до нуля і знайдемо кут при якому залежність  $R_{zn} = f(\alpha)$  має максимум:

$$\alpha_{R_{\max}} = \arctg \left( \frac{S_x}{2L + B_{fp}} \right) \quad (1)$$

Залежність величини радіусу робочої поверхні внутрішнього полюсного наконечника  $R_{вн}$  від кута  $\alpha$  є монотонною без точок екстремуму.

При розрахунку радіусів робочих поверхонь зовнішнього  $R_{zn}$  та внутрішнього  $R_{вн}$  полюсних наконечників максимальний кут коливання  $\alpha_{\max}$

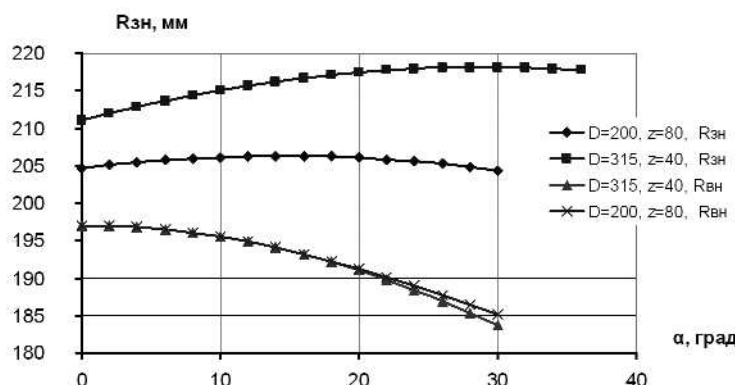


Рис. 1. Залежності радіусів робочих поверхонь зовнішнього та внутрішнього полюсних наконечників від кута коливання (міжцентрова відстань  $R_u=100$  мм, радіус коливань  $L=100$  мм, ширина фрези  $B_{fp}=6$  мм)

вибирається з умов забезпечення необхідних кутів атаки на оброблюваних поверхнях зубів фрези. При цьому, якщо  $\alpha_{max} > \alpha_{Rmax}$ , то для визначення радіусу  $R_{zn}$  робочої поверхні зовнішнього полюсного наконечника потрібно прийняти кут  $\alpha = \alpha_{Rmax}$ , який визначається за формулою (1).

Визначення ширини кінцевої ванни

Ширину кільцевої ванни можна визначити як

$$H = R_{zn} - R_{en} \leq [H],$$

де  $[H]$  – допустима величина робочого зазору в магнітній системі типу "кільцева ванна" ( $[H] = 30 \div 40$  мм).

Основними розмірними параметрами ротора, які входять до формул (19) та (24) [1] для визначення  $R_{zn}$  та  $R_{en}$  є міжцентрова відстань  $R_u$  та радіус коливань  $L$ .

Залежність ширини кільцевої ванни  $H$  від міжцентрової відстані  $R_u$  для найбільших стандартних дискових фрез представлена на рис. 2.

На рис. 2 показано, що ширина кільцевої ванни  $H$  мало залежить від міжцентрової відстані  $R_u$ . Тому при проектуванні верстатів даного типу, цей параметр можна варіювати в широких межах. При інших однакових параметрах великий вплив на величину робочого зазору має діаметр оброблюваної фрези  $D_{fp}$ .

Залежність від другого основного параметру конструкції роторного верстата – від радіусу коливань  $L$  фрези та кількості зубів фрези показана на рис. 3.

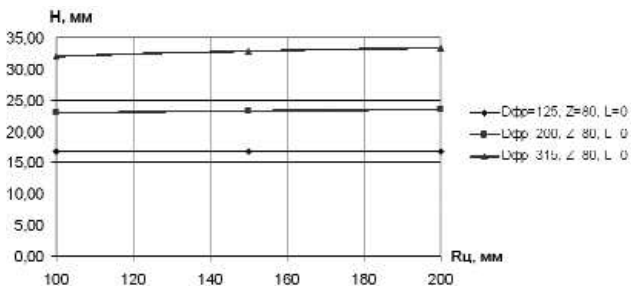


Рис. 2. Залежність ширини робочого зазору від міжцентрової відстані ( $\alpha_{max} = 20^\circ$ ,  $B_{fp} = 6$  мм)

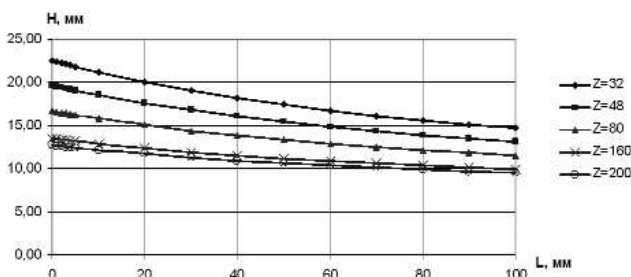


Рис. 4. Залежність ширини робочого зазору від радіусу коливання ( $D_{fp} = 125$  мм,  $R_u = 100$  мм)

Залежність має нелінійний характер і для фрези діаметром 315 мм при зміні величини  $L$  від 0 до 100 мм величина  $H$  змінюється приблизно в 1,6 рази при  $z = 1,6$  і в 1,65 рази при  $z = 32$  фрези. На рис. 4 показана така ж залежність для фрези діаметром 125 мм.

Для цього діаметру при зміні величини  $L$  від 0 до 100 мм величина  $H$  змінюється в 1,25 для фрези з кількістю зубів  $z = 200$  і в 1,5 рази для фрези з кількістю зубів  $z = 32$ .

На рис. 5 представлена залежність ширини кільцевої ванни від радіусу коливань  $L$  для фрези за умови  $R_u + L = \text{const}$ .

Сума міжцентрової відстані  $R_u$  та  $L$  радіусу коливань складає приблизно середній радіус кільцевої ванни:  $R_u + L \approx R_{cp}$ . За умови  $R_u + L = \text{const}$  ширина кільцевої ванни залежить від радіусу коливань  $L$  тим суттєвіше, чим менший середній радіус кільцевої ванни.

Аналіз отриманих результатів показав, що збільшенням радіусу коливання  $L$  при заданій величині максимального кута коливань  $\alpha$  можна значно зменшувати необхідну ширину  $H$  кільцевої ванни. Особливий сенс в цьому є для фрез та пил великих діаметрів з великими зубами. Але при

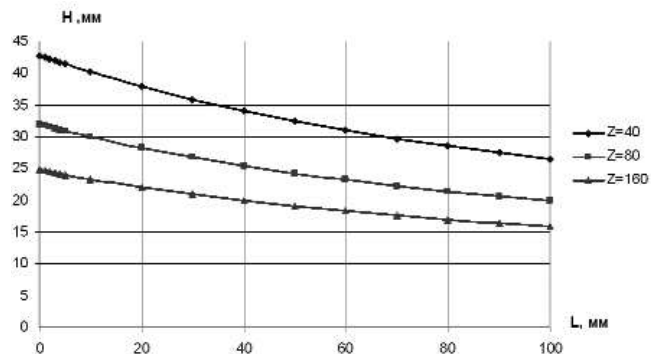


Рис. 3. Залежність ширини робочого зазору від радіусу коливання ( $D_{fp} = 315$  мм,  $R_u = 100$  мм)

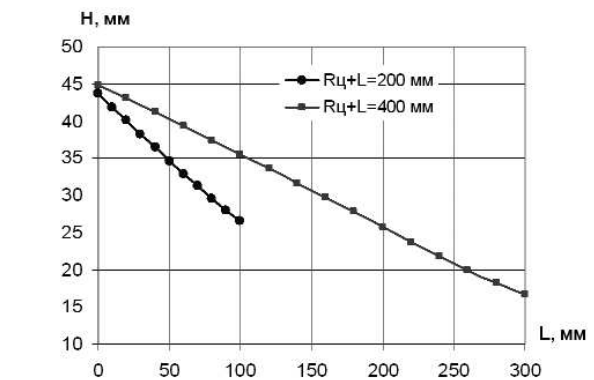
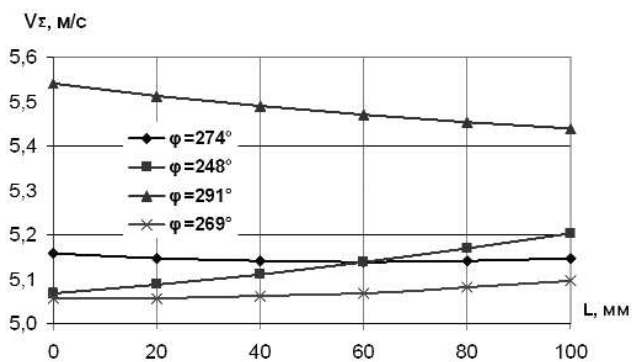


Рис. 5. Залежність ширини кільцевої ванни від радіусу коливань  $L$  за умови  $R_u + L = \text{const}$  ( $D_{fp} = 315$ ,  $z = 40$ )

цьому потрібно мати на увазі, що при зміні радіусу коливань і сталій величині частоти коливань, швидкість коливального руху змінюється, що в певній мірі буде змінювати сумарну швидкість різання і, в результаті цього, кути атаки на оброблюваний поверхнях зуба. Тому потрібно встановити залежність сумарної швидкості різання від величини радіуса коливань  $L$ .

**Вплив величини радіусу коливань на зміну сумарної швидкості різання**

На рис. 6 показана залежність сумарної швидкості точки зуба фрези при обробці задньої поверхні. Кут  $\varphi = 248^\circ$  є кутом, при якому зуб фрези входить в магнітно-абразивний порошок, а кут  $\varphi = 291^\circ$  — коли зуб виходить з порошку. Максимальна різниця сумарної швидкості на проміжку зміни величини  $L = 0-100$  мм для одного кута  $\varphi$  складає максимум 2,5%. При цьому кутові швидкості складових загального руху мають такі значення:  $\omega_p = 25$  рад/с,  $\omega_s = 3,17$  рад/с  $\omega_k = 5,5$  рад/с.



**Рис. 6.** Сумарна швидкість кутової точки головної кромки зуба фрези при обробці задньої поверхні при  $L+R_u=200=\text{const}$  ( $y_B = 0, h = 0, \alpha = 10^\circ, D_{fp}=315$  мм,  $z = 40$ )

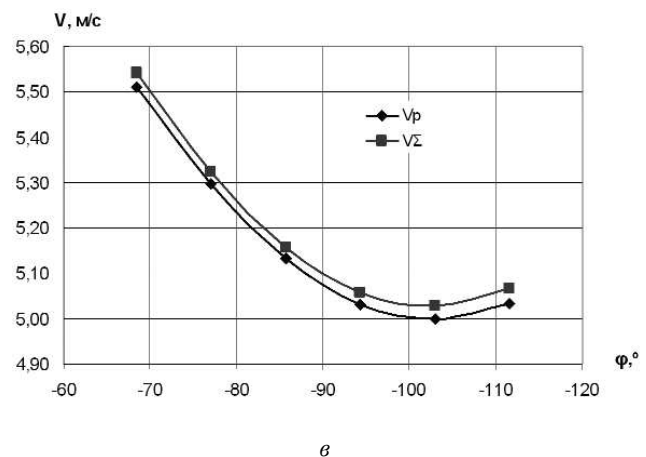
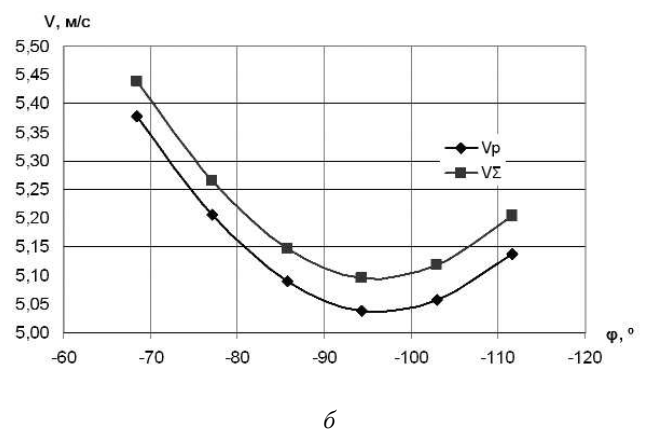
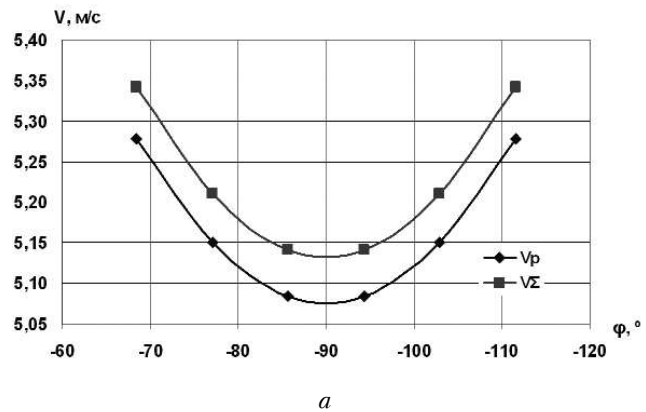
Залежність сумарної швидкості різання  $V_\Sigma$  від кута повороту на головній різальній кромці при обробці передньої поверхні показана на рис. 7.

Максимальне відхилення сумарної швидкості різання від номінальної (5 м/с) в залежності від положення зуба фрези в кільцевій ванні складає не більше 11%, що суттєво не впливає на якість обробки [2].

**Визначення положення фрези по ширині кільцевої ванни**

Положення фрези по поперечному перетині кільцевої ванни можна характеризувати безрозмірною величиною  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = \frac{R_u + L}{R_{cp}} \quad (2)$$



**Рис. 7.** Сумарна швидкість кутової точки головної кромки зуба фрези ( $D_{fp} = 315$  мм,  $z = 40, B_{fp} = 6$  мм,  $y_B = 0, h = 0, \omega_p = 25$  рад/с,  $\omega_s = 3,17$  рад/с,  $\omega_k = 5,5$  рад/с) при обробці передньої поверхні при  $L+R_u=200$  мм = const:  
 а —  $\alpha = 0^\circ, L = 100$  мм; б —  $\alpha = 10^\circ, L = 100$  мм;  
 в —  $\alpha = 10^\circ, L = 0$  мм

На рис. 8 показана залежність параметра  $\varepsilon$  для різних діаметрів фрез з різною кількістю зубів. При збільшенні радіусу коливань  $L$  (рис. 8), зменшенні діаметра фрези, збільшенні кількості зубів (рис. 8 та 9) та збільшенні міжцентрової

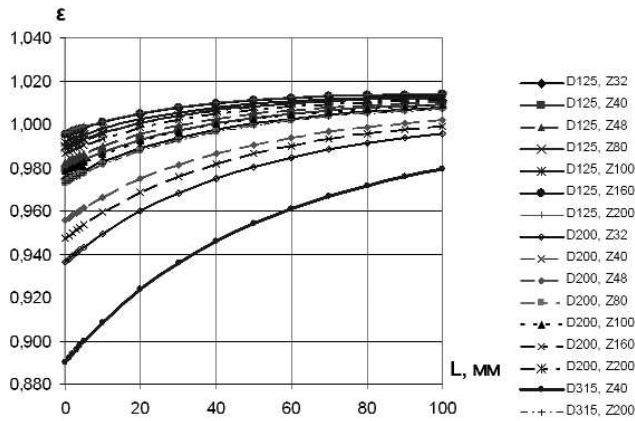


Рис. 8. Залежність  $\epsilon$  від радіусу коливань за умови  $R_u = 100 \text{ мм} = \text{const}$  ( $B_{fp} = 6 \text{ мм}$ ,  $\alpha = 20^\circ$ )

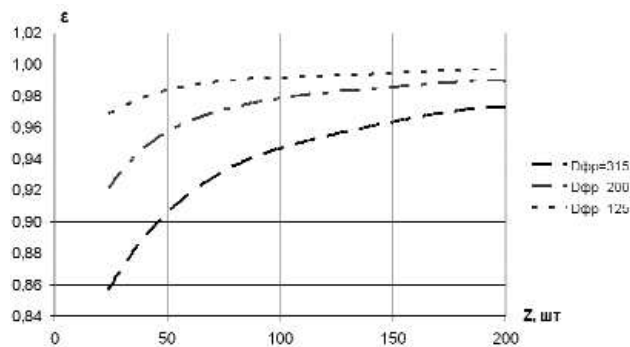


Рис. 9. Залежність параметра  $\epsilon$  від кількості зубів фрези

відстані  $R_u$  (рис. 10) параметр  $\epsilon$  наближається до одиниці. Тому точність визначення параметра  $\epsilon$  (а отже точність установки фрези по поперечному перетині кільцевої ванни) має більше значення для фрез великого діаметру з великими зубами (рис. 9), тобто для фрез діаметрами 160÷315 мм та  $z = 24 \div 100$ . А також при малих радіусах коливань. Наприклад, при середньому радіусі магнітної системи  $R_{cp} = 200 \text{ мм}$  та при відхиленні параметра

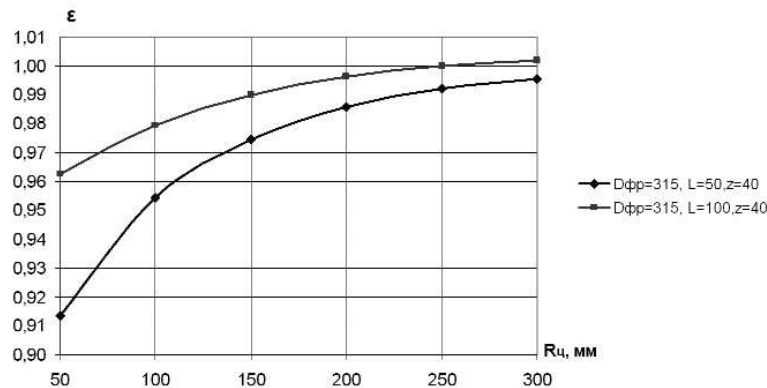


Рис. 10. Залежність  $\epsilon$  від радіусу коливань за умови  $R_u = 100 \text{ мм} = \text{const}$  ( $B_{fp} = 6 \text{ мм}$ ,  $\alpha = 20^\circ$ )

$\epsilon$  на 2% від оптимальної величини, похибка положення дискової фрези по поперечному перетині кільцевої ванни становитиме 4 мм.

Тому потрібно проаналізувати докладніше залежність параметра  $\epsilon$  від радіуса коливань для фрез великого діаметру з великими зубами.

При виборі розмірних параметрів кільцевої ванни магнітної системи та ротора важливим є вибір співвідношення міжцентрової відстані  $R_u$  та радіусу коливань  $L$ .

На рис. 11 показані залежності параметра  $\epsilon$  від радіусу коливання  $L$  за умови  $R_u + L = C = \text{const}$ . Максимальне відхилення параметра  $\epsilon$  від 1 складає 4%.

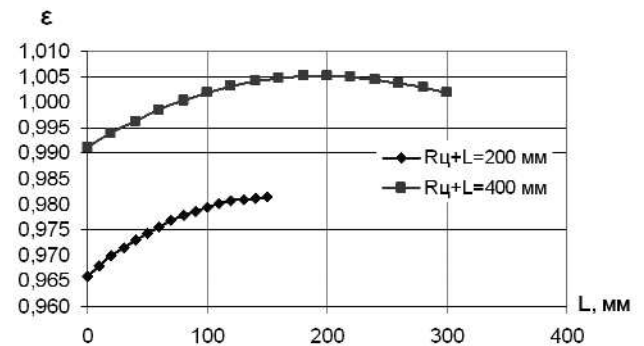


Рис. 11. Залежність параметра  $\epsilon$  від радіусу коливань за умови  $R_u + L = \text{const}$  ( $D_{fp} = 315$ ,  $z = 40$ ,  $B_{fp} = 6 \text{ мм}$ ,  $\alpha = 20^\circ$ )

На рис. 12 представлені ці ж залежності в нормалізованому вигляді. В якості незалежного параметру використано відношення радіусу коливання  $L$  до міжцентрової відстані  $R_u$ , яке визначено за формулою:

$$\frac{L}{R_u} = \frac{C}{R_u} - 1.$$

Аналіз залежностей, представлених на рис. 11 та рис. 12 дозволяє зробити висновок, що при збільшенні середнього радіусу  $R_{cp}$  кільцевої ванни та відношення  $L/R_u$  параметр  $\epsilon$  наближається до 1.

Це означає, наприклад, що при обробці дискової фрези діаметром  $D_{fp} = 315 \text{ мм}$ , при значеннях  $R_{cp} = 400 \text{ мм}$  та  $L/R_u = 0,25$ , її потрібно розміщати посередині перетину кільцевої ванни, а при відношенні  $L/R_u = 0,5$  відхилення від середнього радіусу складе всього 1,6 мм.

Оскільки від положення фрези по поперечному перетині кільцевої ванни залежить величина максимального кута коливання  $\alpha$  (див. рис. 2 [1]), то

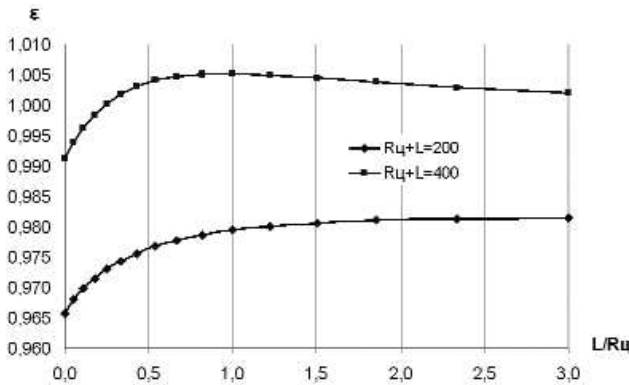


Рис. 12. Залежність параметра  $\epsilon$  від відношення  $L/R_u$  ( $D_{\text{фр}}=315$ ,  $z=40$ ,  $B_{\text{фр}}=6$  мм  $\alpha=20^\circ$ )

визначимо як залежить величина кута коливання  $\alpha$  від точності встановлення фрези в робоче положення. Тобто визначимо залежність кута коливання  $\alpha$  від параметра  $\epsilon$  при заданих розмірах магнітної системи та ротора.

**Залежність максимального кута коливання  $\alpha$  в від параметру  $\epsilon$**

Очевидно, що при заданих розмірах кільцевої ванни та ротору максимально можливий кут коливання можна одержати тільки при одному певному значенні  $\epsilon$ .

Визначимо максимальний кут коливання  $\alpha$ , допустимий при заданих розмірах роторної головки та магнітної системи. При цьому змінним параметром буде величина радіусу коливань  $L$  в межах, який допускає величина робочого зазору  $H$ . Кути коливання визначимо спочатку за виразом (19) [1] для діаметра внутрішнього полюсного наконечника, потім за виразом (24) [1] для діаметра зовнішнього полюсного наконечника. В точці, де ці кути дорівнюють один одному, ми одержимо максимальний кут  $\alpha$  і параметр  $\epsilon$  який йому відповідає при заданих розмірах роторної головки та магнітної системи.

**Визначення  $\alpha$  за внутрішнім діаметром при**

$$\frac{S_x}{2} \leq R_u \cdot \sin \alpha$$

Приведемо рівняння (19) [1] до виду:

$$\left(\frac{S_x}{2}\right) \cdot \sin \alpha - \left(L - \frac{B_{\text{фр}}}{2}\right) \cdot \cos \alpha = \frac{R_u^2 + \left(\frac{S_x}{2}\right)^2 + \left(L - \frac{B_{\text{фр}}}{2}\right)^2 - R_{\text{вн}}^2}{2 \cdot R_u}$$

Після перетворень одержимо квадратне рівняння відносно  $\cos \alpha$ , в якому позначимо через  $A$  вираз:

$$A = \frac{R_u^2 + \left(\frac{S_x}{2}\right)^2 + \left(L - \frac{B_{\text{фр}}}{2}\right)^2 - R_{\text{вн}}^2}{R_u}$$

Після приведення одержимо:

$$\cos \alpha_{1,2} = \frac{-A(2L - B_{\text{фр}}) \pm S_x \sqrt{(2L - B_{\text{фр}})^2 + S_x^2 - A^2}}{(2L - B_{\text{фр}})^2 + S_x^2} \quad (3)$$

Оскільки  $L + R_u \approx R_{cp}$  і, якщо розглядати параметри цього виразу по відношенню до реальної конструкції, то в цьому виразі змінним параметром є величина радіусу коливань  $L$ . Її можна представити у вигляді  $L = L_0 + \Delta L$ , де  $L_0$  можна визначити з умови  $L_0 + R_u = R_{cp}$ , а  $\Delta L = R_{cp} \cdot (\epsilon - 1)$ , тобто  $L = L_0 + R_{cp} \cdot (\epsilon - 1)$ .

Підставимо значення  $L = L_0 + R_{cp} \cdot (\epsilon - 1)$  в (2), врахуємо те, що рішення (3) існує при знаку "+" перед коренем, і отримаємо:

$$\alpha = \arccos \left\{ \frac{-A \cdot \left\{ 2 \cdot [L_0 + R_{cp} \cdot (\epsilon - 1)] - B_{\text{фр}} \right\}}{\left\{ 2 \cdot [L_0 + R_{cp} \cdot (\epsilon - 1)] - B_{\text{фр}} \right\}^2 + S_x^2} + \frac{S_x \sqrt{\left\{ 2 \cdot [L_0 + R_{cp} \cdot (\epsilon - 1)] - B_{\text{фр}} \right\}^2 + S_x^2 - A^2}}{\left\{ 2 \cdot [L_0 + R_{cp} \cdot (\epsilon - 1)] - B_{\text{фр}} \right\}^2 + S_x^2} \right\} \quad (4)$$

Для заданих розмірів головки та магнітної системи це рішення існує при наступних значеннях

параметра  $\epsilon$  (із умови, що  $L \geq L_0 - \left(\frac{H}{2} - \frac{B_{\text{фр}}}{2}\right)$ ):

$$\epsilon \geq 1 - \frac{H - B_{\text{фр}}}{2 \cdot R_{cp}} \quad (5)$$

**Визначення  $\alpha$  за внутрішнім діаметром при**

$$\frac{S_x}{2} \geq R_u \cdot \sin \alpha$$

Із формули [1]  $R_{\text{вн}} = R_u \cdot \cos \alpha + \left(L - \frac{B_{\text{фр}}}{2}\right)$

знайдемо значення кута  $\alpha$ .

$$\alpha = \arccos \frac{R_{\text{вн}} - \left[L_0 + R_{cp} \cdot (\epsilon - 1) - \frac{B_{\text{фр}}}{2}\right]}{R_u} \quad (6)$$

Обмеження для  $\epsilon$  за виразом (5).

**Визначення  $\alpha$  за зовнішнім діаметром**

Приведемо рівняння (24) [1] до виду:



$$\left(\frac{S_x}{2}\right) \cdot \sin \alpha + \left(L + \frac{B_{\text{фр}}}{2}\right) \cdot \cos \alpha = \frac{R_{\text{ц}}^2 + \left(\frac{S_x}{2}\right)^2 + \left(L + \frac{B_{\text{фр}}}{2}\right)^2 - R_{\text{зн}}^2}{2 \cdot R_{\text{ц}}} \quad (7)$$

Після перетворень одержимо квадратне рівняння відносно  $\cos \alpha$ , в якому через  $B$  позначимо вираз

$$B = \frac{R_{\text{ц}}^2 + \left(\frac{S_x}{2}\right)^2 + \left(L + \frac{B_{\text{фр}}}{2}\right)^2 - R_{\text{зн}}^2}{R_{\text{ц}}}$$

підставимо замість  $L$  вираз  $L = L_0 + R_{\text{ср}} \cdot (\varepsilon - 1)$  і після перетворень одержимо:

$$\alpha = \arccos \left\{ \frac{B \cdot \left\{ 2 \cdot [L_0 + R_{\text{ср}} \cdot (\varepsilon - 1)] + B_{\text{фр}} \right\}}{\left\{ 2 \cdot [L_0 + R_{\text{ср}} \cdot (\varepsilon - 1)] + B_{\text{фр}} \right\}^2 + S_x^2} + \frac{S_x \cdot \sqrt{\left\{ 2 \cdot [L_0 + R_{\text{ср}} \cdot (\varepsilon - 1)] + B_{\text{фр}} \right\}^2 + S_x^2 - B^2}}{\left\{ 2 \cdot [L_0 + R_{\text{ср}} \cdot (\varepsilon - 1)] + B_{\text{фр}} \right\}^2 + S_x^2} \right\} \quad (8)$$

При цьому обмеження для  $\varepsilon$  визначається з умови, що прямокутник з розмірами  $S_x \times B_{\text{фр}}$  впирається кутами в коло з радіусом  $R_{\text{зн}}$  (див. рис. 2, а [1]):

$$L \leq \sqrt{R_{\text{зн}}^2 - \left(\frac{S_x}{2}\right)^2} - \frac{B_{\text{фр}}}{2} - R_{\text{ц}}$$

Підставивши в ліву частину  $L = L_0 + R_{\text{ср}} \cdot (\varepsilon - 1)$  після приведення одержимо:

$$\varepsilon \leq \frac{\sqrt{R_{\text{зн}}^2 - \left(\frac{S_x}{2}\right)^2} - \frac{B_{\text{фр}}}{2}}{R_{\text{ср}}} \quad (9)$$

Залежності кута коливання  $\alpha$  від параметра  $\varepsilon$ , визначені за формулами (3), (5) та (7), приведені на рис. 13.

Максимальне значення кута коливання  $\alpha$  при заданих розмірах кільцевої ванни та головки визначається точкою перетину кривих.

Наприклад, при  $L_0 = 100$  мм,  $R_{\text{ц}} = 100$  мм,  $z = 40$ ,  $D_{\text{фр}} = 315$  мм,  $R_{\text{зн}} = 185$  мм,  $H = 30$  мм, кут  $\alpha \approx 24,12^\circ$  і параметр  $\varepsilon \approx 0,984$  (рис. 13).

#### Кути атаки на поверхнях зуба фрези

Дослідження залежностей кутів атаки від кута коливання  $\alpha$  та складових сумарної швидкості різання  $V_p$ ,  $V_s$ ,  $V_k$  на поверхнях зуба дискових фрез та пил було виконано на прикладі фрези  $D_{\text{фр}} = 315$  мм,  $z = 40$ ,  $B_{\text{фр}} = 6$  мм.

#### Кути атаки на передній поверхні

Залежність кута атаки на передній поверхні зубів від кута повороту фрези представлена на рис. 14.

Кути атаки на передній поверхні зуба фрези уздовж бічних різальних кромek майже не залежать від висоти зуба — різниця складає соті долі градуса.

Як бачимо, передня поверхня зуба на протязі всього шляху знаходження в кільцевій ванні знаходиться в несприятливих умовах, якщо врахувати що оптимальний кут з точки зору якості обробки дорівнює  $30^\circ$  [3].

На рис. 15 показана залежність кута атаки  $\chi$  на передній поверхні кутової точки зуба від кута коливань  $\alpha$  для різних кутів повороту фрези.

Спостерігається значна залежність кута атаки на передній поверхні від кута коливань при вході в порошок ( $\varphi \approx 68^\circ$ ). В середній частині оброблюваного сектора фрези ( $\varphi \approx 94^\circ$ ) він мало залежить від кута коливань, а на виході з порошку ( $\varphi \approx 110^\circ$ ) спостерігається екстремальна залежність від кута коливань при незначній зміні кута атаки на  $2 \div 3^\circ$ .

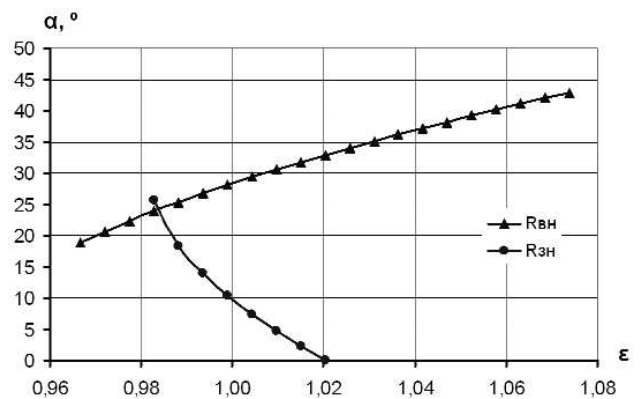


Рис. 13. Залежність кута  $\alpha$  від параметра  $\varepsilon$  (при  $L_0 = 100$  мм,  $R_{\text{ц}} = 100$  мм,  $z = 40$ ,  $D_{\text{фр}} = 315$  мм,  $R_{\text{зн}} = 185$  мм,  $H = 30$  мм)

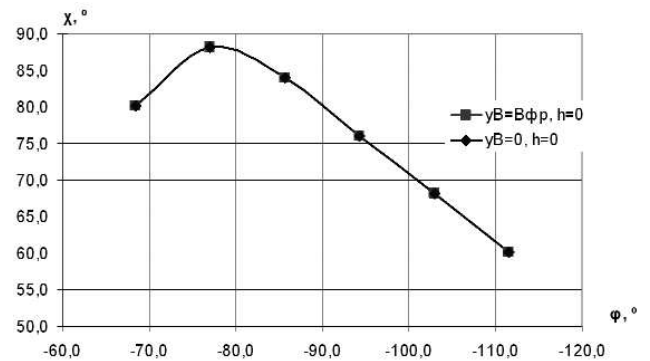
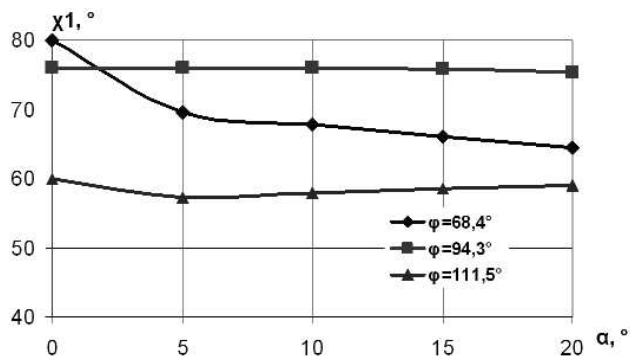
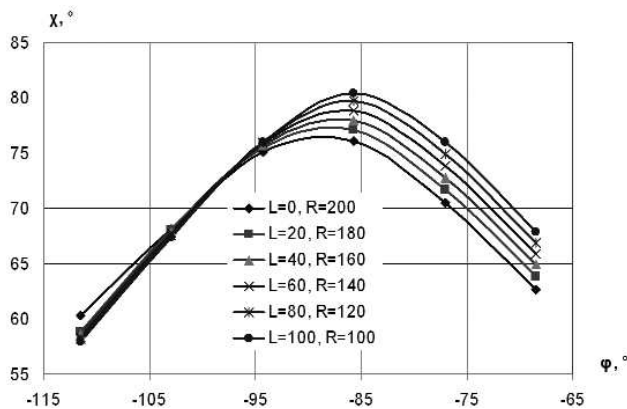


Рис. 14. Залежність кута атаки на передній поверхні від кута повороту фрези ( $L = 100$  мм,  $R_{\text{ц}} = 100$  мм,  $V_s \approx 0,1V_p$ ,  $\alpha = 0^\circ$ )



**Рис. 15.** Залежність кута атаки на передній поверхні зуба у початковій точці головної різальної кромки ( $y_B = 0, h = 0$ ) від кута коливання ( $R_u = 100$  мм,  $L = 100$  мм)

На рис. 16 показана залежність кута атаки на передній поверхні зуба в зовнішньому кутку головної різальної кромки при  $\alpha = 10^\circ, L + R_u = \text{const} = 200$  мм і зміні значення  $L$  від 0 до 100 мм.



**Рис. 16.** Залежність кута атаки на передній поверхні зуба в зовнішньому кутку головної різальної кромки при  $\alpha = 10^\circ, L + R_u = \text{const} = 200$  мм

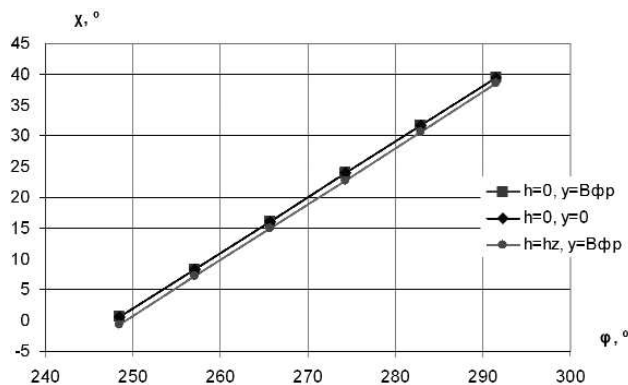
Кути атаки на передній поверхні практично не залежать від радіусу коливань при виході із порошку ( $\varphi \approx 94\div 110^\circ$ ).

При вході в порошок при зменшенні радіусу коливань кут атаки зменшується в середньому на  $6^\circ$ . При цьому кути атаки знаходяться в межах  $58\div 81^\circ$ . Тобто зменшення кутів атаки на передній поверхні при зменшенні радіусу коливань є позитивним явищем.

### Кути атаки на задній поверхні

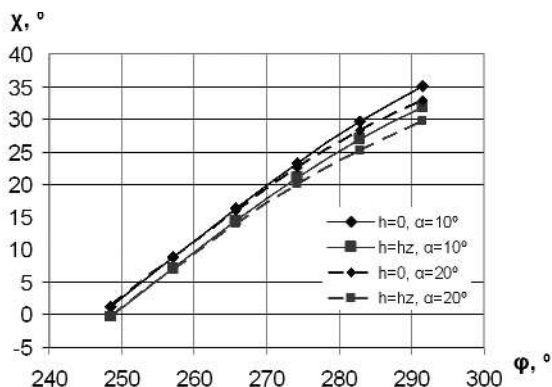
Кут атаки на задній поверхні зубів представлені на рис. 17. Задня поверхня знаходиться в більш сприятливих умовах, ніж передня. Тут їх величина не перевищує  $40^\circ$ . Найбільш сприятливою є зона виходу задньої поверхні з порошку.

Біля основи зуба кути атаки практично ті ж самі – різниця складає десь біля одного градуса.



**Рис. 17.** Кути атаки на задній поверхні в початковій і кінцевій точках головної різальної кромки ( $h=0, y_B = 0, y_B = B_{\phi p}$ ) та біля основи зуба ( $h = h_Z, y_B = B_{\phi p}$ ) при обробці задньої поверхні зуба для різних ділянок робочої зони при  $\alpha = 0^\circ$

Зміна кута коливання в межах  $10\div 20^\circ$  мало впливає на зміну кута атаки на задній поверхні. Його величина в одних і тих же точках змінюється в межах кількох градусів (рис. 18).



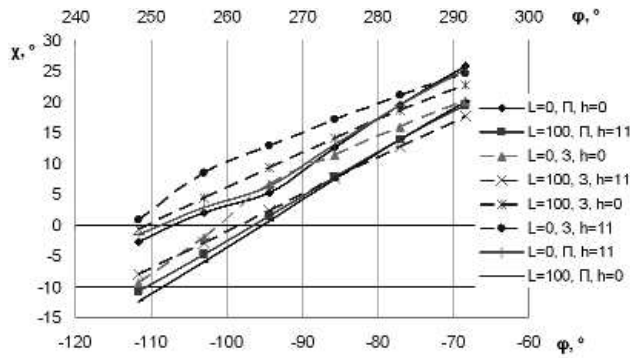
**Рис. 18.** Кути атаки на задній поверхні в початковій і кінцевій точках головної різальної кромки ( $h=0, y_B = 0, y_B = B_{\phi p}$ ) та біля основи зуба ( $h = h_Z, y_B = B_{\phi p}$ ) при обробці задньої поверхні зуба для різних ділянок робочої зони

### Кути атаки на бокових поверхнях

Якщо прийняти, що кути в плані  $\varphi_1 = 0^\circ$ , то при  $\alpha = 0^\circ$  кути атаки на бокових поверхнях зуба дорівнюють нулю. Якщо врахувати, що кути в плані  $\varphi_1$  більш нуля ( $\varphi_1 = 1 \approx 2^\circ$  і більше), то бокова поверхня буде в "тіні" і оброблятися не буде.

При куті коливання  $\alpha = 10^\circ$  на боковій зовнішній поверхні абсолютні значення кутів атаки змінюються від  $-12^\circ$  до  $25^\circ$  (рис. 19).

Від'ємні значення кутів атаки в даних точках бокової (чи іншої) поверхні говорять про те, що ці точки знаходяться в "тіньовій зоні" і не обробляються. Результати розрахунків свідчать про те, що тіньова зона для бокової зовнішньої поверхні



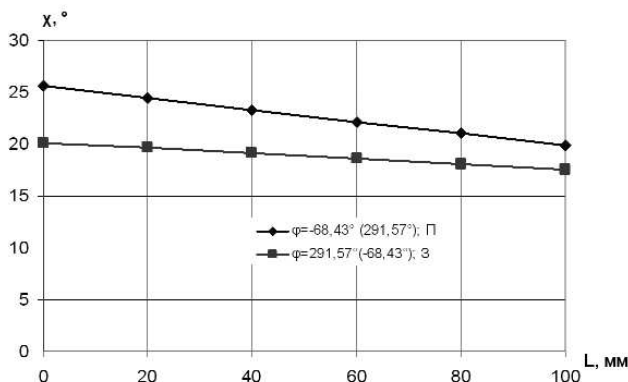
**Рис. 19.** Кути атаки на зовнішній боковій поверхні дискової фрези вздовж головної бокової різальної кромки при: суцільні лінії – при обробці передньої поверхні, нижня шкала кутів повороту фрези  $\varphi$ ; штрихові лінії – при обробці задньої поверхні, верхня шкала кутів повороту фрези  $\varphi$

є невеликою і складає менше третини оброблюваного сектора. Абсолютні значення кутів атаки при обробці передньої поверхні при інших однакових умовах більші, ніж при обробці задньої поверхні. Це пояснюється тим, що вектори швидкості обертання фрези та обертання ротора при обробці задньої поверхні направлені в одну сторону, а при обробці передньої – в протилежні. При вході зуба в порошок спостерігається більша різниця між величиною кута атаки по висоті зуба ніж при виході. На вході ми маємо різницю  $10^\circ$ , а на виході різниця складає не більше  $5^\circ$ .

Аналогічні залежності кутів атаки спостерігаються і для внутрішньої бокової поверхні фрези.

При збільшенні радіусу коливань кут атаки зменшується (рис. 20). При зміні величини радіусу коливань  $L$  в діапазоні  $0 \div 100$  мм, кут змінюється на  $6^\circ$ .

Але враховуючи те, що при регулюванні положення фрези в кільцевій ванні діапазон зміни радіусу коливань не може перевищувати ширини



**Рис. 20.** Залежність кута атаки на боковій зовнішній поверхні фрези від радіусу коливань на вершині зуба ( $R_d + L = \text{const}$ ): при обробці передньої (П) та задньої (З) поверхонь

кільцевої ванни Н, яка може складати  $30 \div 40$  мм, то зменшення кута атаки не буде перевищувати кількох градусів.

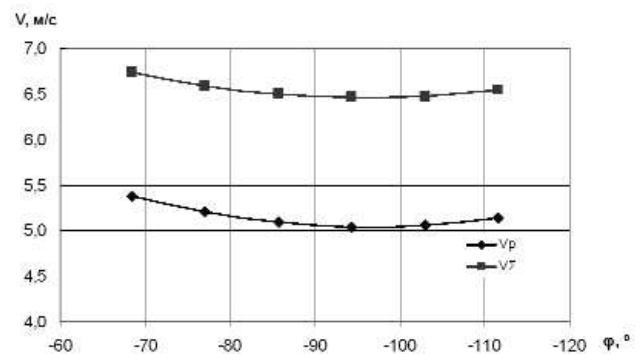
### Вплив складових сумарної швидкості різання на кути атаки

Величина швидкості головного руху  $V_p$ , вибирається з умов забезпечення якості та продуктивності обробки і тому використовуватись для управління кутами атаки на оброблювану поверхню може використовуватись в досить обмеженому діапазоні. Крім того, швидкість головного руху мало впливає на кути атаки. Наприклад при зміні швидкості в два рази кут атаки на передній поверхні змінюється на  $2\%$ . Приблизно така залежність спостерігається на інших поверхнях зуба.

Швидкість коливального руху  $V_k$  повинна бути значно нижча від швидкості головного руху, тому що при значеннях, близьких до швидкості головного руху, будуть інтенсивно тупитись різальні кромки зуба фрези. При значних змінах швидкості коливального руху (наприклад в  $3 \div 4$  рази) кути атаки на передній та задній поверхнях змінюються на  $2 \div 3^\circ$  при  $L=100$ , на  $2 \div 10^\circ$  при  $L=100$  і на  $8 \div 20^\circ$  на бокових поверхнях зуба. При цьому при  $L=0$  бокові поверхні зубів на виході із порошку попадають в "тіньову зону". Крім того, значне підвищення швидкості коливального руху збільшує динамічні навантаження на верстат.

Величина швидкості кругової подачі  $V_s$  обмежена лише тим, що сумарна швидкість різання не повинна перевищувати межу, при якій почнуть знижуватись якість оброблюваної поверхні та виноситись порошок із кільцевої ванни.

На рис. 21 показані значення сумарної швидкості різання вздовж сектора дискової фрези, який занурений в порошок. Перевищення сумарної швидкості різання від швидкості головного руху при цьому складає менше  $30\%$ . При  $V_s = 0,4V_p$ , перевищення складає не більше  $9\%$ . При цьому

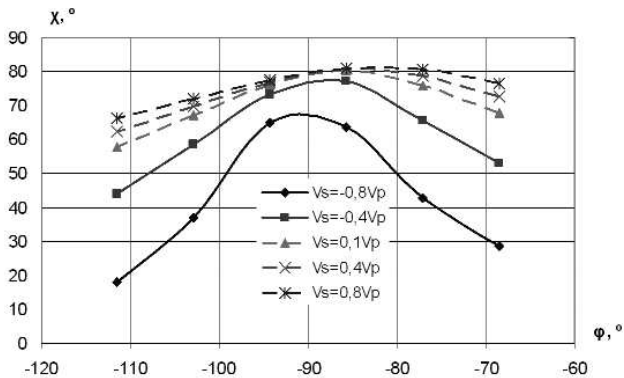


**Рис. 21.** Сумарна швидкість різання вздовж оброблюваного сектора дискової фрези при  $V_s = 0,8V_p$  ( $L = 100$  мм,  $R_d = 100$  мм,  $\alpha = 10^\circ$ )



вплив швидкості кругової подачі  $V_S$  на кути атаки на поверхнях зуба фрези значно помітніший.

При швидкості кругової подачі  $V_S = 0,8V_P$  при обробці передньої поверхні зуба зустрічним методом кути атаки зменшуються на вході і виході оброблюваного сектору фрези (в порівнянні з  $V_S = 0,1V_P$ ) на  $15-40^\circ$  і на  $8-15^\circ$  в середній частині оброблюваного сектору (рис. 22).



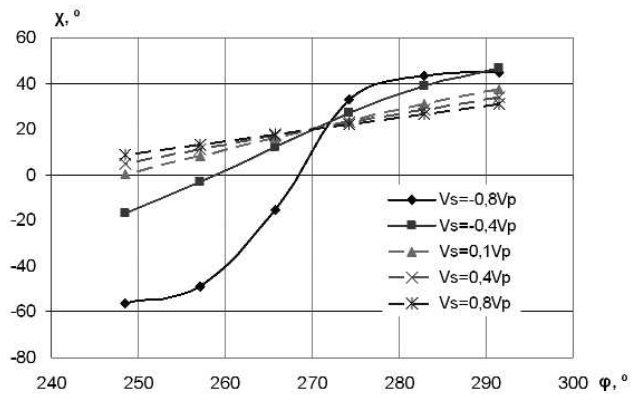
**Рис. 22.** Кути атаки на передній поверхні при методах обробки ( $L = 100$  мм,  $R_u = 100$  мм,  $\alpha = 10^\circ$ ): зустрічному (суцільні лінії) та попутному (штрихові лінії)

При цій же швидкості при попутному методі обробки кути атаки збільшуються мало — на  $3-10^\circ$  на вході і виході оброблюваного сектору фрези, і на  $0-3^\circ$  в середній частині оброблюваного сектору.

Крім того, при зустрічному методі обробки ця залежність круто змінюється з обох сторін від зони максимальних кутів атаки всередині оброблюваного сектора фрези. В цих зонах кути атаки знаходяться в межах  $18-55^\circ$ . При попутному методі кути атаки в цих зонах складають  $60-80^\circ$ . Оскільки зазначені криві не перетинають осі абсцис, то можна зробити висновок, що при обробці передньої поверхні ні попутним, ні зустрічним методами задня поверхня знаходиться в тінювій зоні і не обробляється.

Залежність кутів атаки від  $V_S$  на задній поверхні зуба (рис. 23) має дещо інший вигляд. При зустрічному методі обробки на вході в оброблюваний сектор фрези кути атаки значно зменшуються (див. рис. 17) і при  $V_S = 0,8V_P$  до половини оброблюваного сектору знаходиться в "тінювій зоні".

Оскільки задня поверхня у вказаній частині оброблюваного сектору фрези знаходиться в "тінювій зоні", то можна зробити висновок, що при цьому обробляється передня поверхня зуба фрези. Це відбувається тому, що вектор сумарної швидкості направлений проти вектора швидкості



**Рис. 23.** Кути атаки на задній поверхні при методах обробки ( $L = 100$  мм,  $R_u = 100$  мм,  $\alpha = 10^\circ$ ): зустрічному (суцільні лінії) та попутному (штрихові лінії)

головного руху — коли фреза обертається та коливається за годинниковою стрілкою, а роторна головка обертається проти годинникової стрілки.

На виході оброблюваного сектору кути атаки зростають і значно більше, ніж при попутному методі обробки. Значення кутів атаки при цьому мають  $20-40^\circ$ .

При попутному методі обробки кути атаки на задній поверхні монотонно збільшуються від  $10^\circ$  на вході оброблюваного сектору до  $30^\circ$  при  $V_S = 0,8V_P$  і з  $0^\circ$  до  $38^\circ$  при  $V_S = 0,1V_P$ .

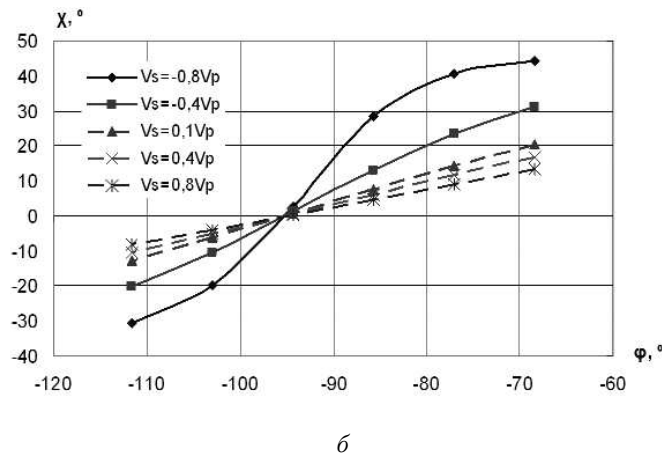
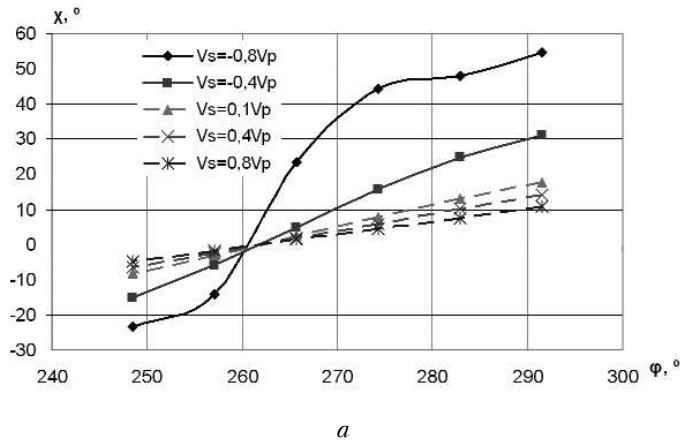
Залежність кутів атаки на бокових поверхнях від швидкості кругової подачі представлені на рис. 24. При збільшенні швидкості кругової подачі величина "тінювої зони" на відміну від передньої та задньої поверхонь майже не збільшується.

При зустрічному методі обробки задньої поверхні при збільшенні швидкості кругової подачі кути атаки зростають при  $V_S = 0,4V_P$  до  $15-32^\circ$ , а при  $V_S = 0,8V_P$  до  $50-55^\circ$  на виході із оброблюваного сектора фрези. В останньому випадку величини кутів атаки більш рівномірно розподілені.

При попутному методі обробки задньої поверхні збільшення швидкості кругової подачі призводить до зменшення кутів атаки до  $10^\circ$  і змінюються вони повільніше, ніж при зустрічному.

При обробці передньої поверхні попутним методом кути атаки зростають при  $V_S = 0,4V_P$  до  $10-30^\circ$ , а при  $V_S = 0,8V_P$  до  $25-42^\circ$  на вході в оброблюваний сектор фрези. В останньому випадку величини кутів атаки більш рівномірно розподілені.

При зустрічному методі обробки задньої поверхні збільшення швидкості кругової подачі призводить до зменшення кутів атаки до  $12^\circ$  і змінюються вони повільніше, ніж при попутному.



**Рис. 24.** Кути атаки на боковій внутрішній поверхні ( $L = 100$  мм,  $R_u = 100$  мм,  $\alpha = 10^\circ$ ):  
 а – при обробці задньої поверхні: зустрічним (суцільні лінії) та попутним (штрихові лінії) методами; б – при обробці передньої поверхні зустрічним (суцільні лінії) та попутним (штрихові лінії) методами

#### Висновки

1. Розроблена математична модель кінематики обробки дискових фрез дозволила провести дослідження, в результаті яких встановлено:

- основні залежності розмірних параметрів ротора та магнітної системи верстата від кінематичних параметрів процесу обробки;

- при традиційних співвідношеннях величин складових сумарної швидкості обробки передня та бокові поверхні зуба знаходяться несприятливих умовах;

- вибір певних розмірних параметрів ротора та магнітної системи і варіювання складових сумарної швидкості різання дозволяють в певних межах керувати величинами кутів атаки на поверхнях зубів фрези.

2. Основними задачами подальших досліджень кінематики MAO дискових фрез та пил на роторному верстаті є:

- розробка рекомендацій з вибору розмірних параметрів ротора та магнітної системи верстата;

- розробка методики проектування верстатів роторного типу на основі магнітної системи типу "кільцева ванна" для обробки дискових фрез та пил.

#### Література

1. Гейчук В.М., Шевчук В.А., Гаєрушкевич 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. Майборода В.С. Основи створення і використання порошкового магнітно-абразивного інструменту для фінішної обробки фасонних поверхонь. Дис. докт. техн. наук. – Київ, 2001. – 404 с.

3. Майборода В.С., Гейчук В.М., Степанов О.В. "Спосіб магнітно-абразивної об'ємної обробки." Патент України на винахід №25441 А, МПК В 24 В 31/112, Бюл. №6, 15.12.98.