

**РОТОРНІ ВЕРСТАТИ ДЛЯ МАГНІТНО-АБРАЗИВНОЇ
ОБРОБКИ НА БАЗІ МАГНІТНОЇ СИСТЕМИ ТИПУ "КІЛЬЦЕВА
ВАННА": АНАЛІЗ КІНЕМАТИКИ ОБРОБКИ СПІРАЛЬНИХ
СВЕРДЕЛ**

На основі розробленої раніше математичної моделі виконано аналіз кінематики процесу магнітно-абразивної обробки спіральних свердел. Визначено характер зміни і значення кутів атаки на робочій стороні гвинтового рівчака свердла, в тому числі на головній різальній кромці. Встановлено, що в найбільш несприятливих умовах знаходиться частина поверхні, розташована поблизу серцевини свердла. Зміна співвідношення швидкостей головного руху та кругової подачі при підтриманні на сталому рівні сумарної швидкості різання дозволяє в певних межах цілеспрямовано змінювати величини кутів атаки на оброблюваних поверхнях.

Постановка проблеми та аналіз попередніх досліджень. Для дослідження кінематики процесу МАО спіральних свердел на роторних верстатах з магнітною системою типу "кільцева ванна" з торцевим завантаженням оброблюваного інструменту було розроблено математичну модель кінематики процесу [1].

Метою даної роботи є дослідження впливу розмірних параметрів свердел, основних розмірів верстата та складових сумарної швидкості різання на кути атаки на передній поверхні та головній різальній кромці.

Результати виконаних досліджень. Дослідження залежностей кутів атаки від розмірних параметрів свердел, основних розмірів роторного верстата та складових сумарної швидкості різання на передній поверхні та головній різальній кромці було виконано на прикладі свердла з такими параметрами: діаметр $D = 20$ мм, коефіцієнт радіуса серцевини свердла $k_D = 0,15$ мм, кут нахилу гвинтової канавки $\omega_c = 30^\circ$, кут при вершині свердла $\varphi_c = 120^\circ$, довжина робочої частини свердла $L_p = 105$ мм, висота полюсного наконечника $H_{PN} = 30$ мм, кут нахилу свердла до осі магнітної системи $\xi = 60^\circ$, кут $\alpha = \pm 15^\circ$. Швидкість руху свердла вздовж кільцевої ванни (швидкість

головного руху) складала $V_p = 5$ м/с незалежно від середнього радіуса "кільцевої ванни", а початкова швидкість руху свердла навколо своєї осі (швидкість кругової подачі) складала $V_{s0} = 0,1 \cdot V_p = 0,5$ м/с. Кутова швидкість головного руху при цьому визначалась за формулою: $\omega_p = 2 \cdot V_p / D_{cp}$, початкова кутова швидкість кругової подачі – $\omega_s = 2 \cdot V_{s0} / D$.

При заданій довжині робочої частини свердла L_p , висоті полюсних наконечників H_{PN} та куті нахилу ξ обробка свердла повинна виконуватись за два переходи. Довжина свердла L_I , яка обробляється за першим переходом, визначається за формулою:

$$L_I = \frac{H_{PN} - D \cdot \sin \xi / 2}{\sin(\pi/2 - \xi)} \quad (1)$$

При виведенні цієї формули прийнято, що половина свердла до його осі у верхній частині кільцевої ванни знаходиться у робочому просторі кільцевої ванни (рис. 2 [1]).

Кут гвинтової лінії при цьому:

$$\zeta_I = L_I / h = \frac{H_{PN} - D \cdot \sin \xi / 2}{\sin(\pi/2 - \xi) \cdot h} \quad (2)$$

Довжина ділянки, яка оброблятиметься за наступним переходом, визначається як $L_{II} = L_p - L_I$, відповідний їй кут розвороту гвинтової лінії як $\zeta_{II} = L_{II} / h$. З іншого боку, за висотою полюсного наконечника $L_{II} = H_{PN} / \sin(\pi/2 - \xi)$. При цьому приймаємо, що наступна ділянка знизу і зверху до половини діаметра (по осьовій лінії свердла) знаходиться в порошоку робочої зони.

З врахуванням сказаного величина зміщення T_Z вздовж осі Z ((1) [1]) повинна отримати такий вигляд:

$$T_Z = (H_{PN} - D \cdot \sin \xi) / 2 + H_{PN} \cdot (n_3 - 1), \quad (3)$$

де n_3 – номер переходу.

При заданих параметрах $\zeta_I = 141,2^\circ$, $\zeta_{II} = 198,5^\circ$.

Залежність кутів атаки від кутів розвороту профілю. На рис. 1 представлені значення кутів атаки на робочій стороні гвинтового

рівчачка свердла на гвинтових лініях, які проходять через три характерні точки головної різальної кромки з координатами $R_X = 1,5$ мм, $R_X = 5,75$ мм та $R_X = 10,0$ мм на першому і другому переходах.

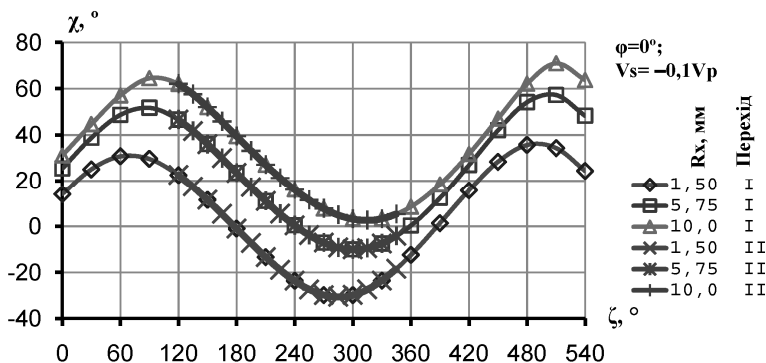
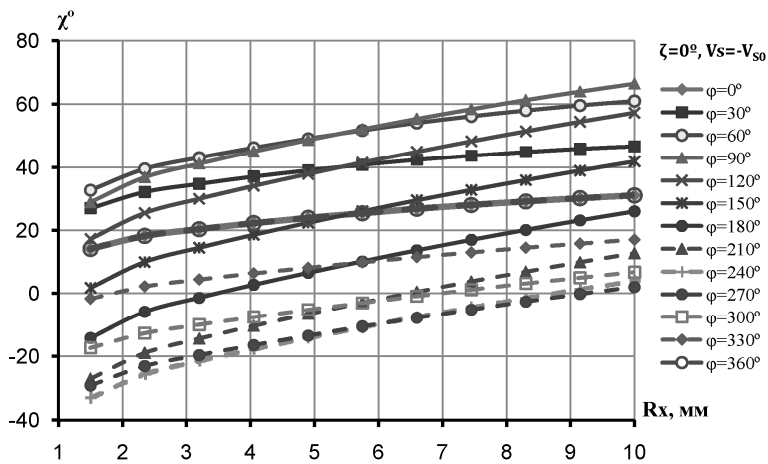


Рис. 1. Куты атаки на передней гвинтовой поверхности спирального свердла на гвинтовых линиях, які проходять через три характерні точки головної різальної кромки ($\alpha = 0^\circ$)

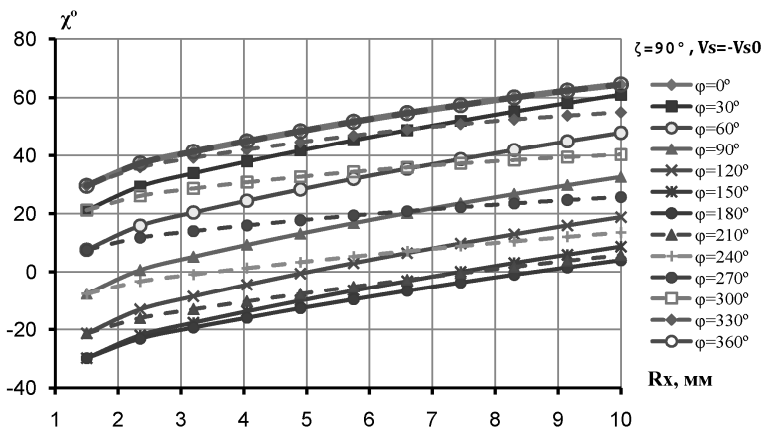
В результаті аналізу цих залежностей можна зробити висновок, що величини кутів атаки від координати Z , а отже і від зміщення T_2 , не залежать. Про це свідчать суміщення кутів атаки на першому та другому переходах.

Оскільки при висоті полюсних наконечників $H_{PN} = 30$ мм кут розвороту профілю гвинтового рівчачка $\zeta = 198,5^\circ$ та у зв'язку з тим, що нас цікавлять кути атаки на передній поверхні свердла, в подальшому обмежимося дослідженням кутів атаки при кутах розвороту профілю в межах $0^\circ \leq \zeta \leq 180^\circ$.

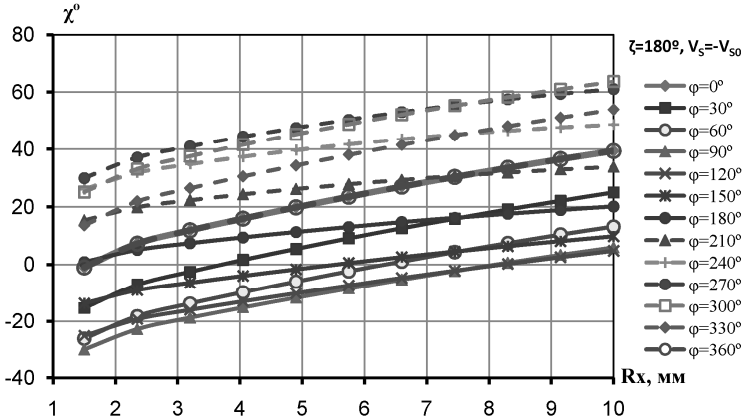
Залежність кутів атаки від кутового положення. На рис. 2 представлені кути атаки вздовж різальної кромки при різних кутах розвороту профілю та кутових положеннях.



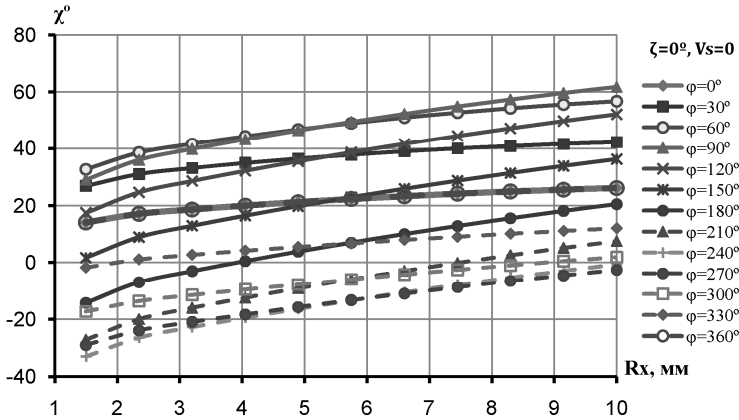
a)



b)



а)



б)

Рис. 2. Кути атаки вздовж різальної кромки при різних кутах розвороту профілю ($\alpha = 0^\circ$): а, б, в – при від'ємній початковій швидкості кругової подачі ($V_s = -V_{s0}$); г – при нульовій швидкості кругової подачі

За результатами аналізу наведених залежностей встановлено, що:

– кути атаки є найбільшими на головній різальній кромці та в точках на робочій стороні гвинтового ривчака, тоді коли вони знаходяться нижче осі свердла при кутах повороту $\varphi = 60^\circ$ (для $R_x \leq 5$ мм) та $\varphi = 90^\circ$ (для 5 мм $< R_x \leq 10$ мм) при $\zeta = 0^\circ$ (рис. 2, а); $\varphi =$

0° та $\varphi = 360^\circ$ при $\zeta = 90^\circ$ (рис. 2, б); $\varphi = 270^\circ$ (для $R_x \leq 5$ мм) та $\varphi = 300^\circ$ (для $7 \text{ мм} < R_x \leq 10$ мм) при $\zeta = 180^\circ$ (рис. 2, в). Значення кутів атаки в точці з $R_x = 1,5$ мм складають в середньому $\chi = 30^\circ$, а в точці з $R_x = 10,0$ мм вони складають $\chi = 63^\circ$;

– величини кутів атаки є найменшими на головній різальній кромці та в точках на робочій стороні гвинтового рівчака тоді, коли відповідні точки знаходяться вище осі свердла, тобто при кутах повороту φ або кутах розвороту профілю ζ , які відрізняються від попередніх кутів на 180° . На рис. 2, а це – дві криві: $\varphi = 240^\circ$ (для $R_x \leq 5$ мм) та $\varphi = 270^\circ$ (для $5 \text{ мм} < R_x \leq 10$ мм) при $\zeta = 0^\circ$; на рис. 2, б – крива $\varphi = 180^\circ$ при $\zeta = 90^\circ$; на рис. 2, в – криві $\varphi = 90^\circ$ (для $R_x \leq 5$ мм) та $\varphi = 120^\circ$ (для $7 \text{ мм} < R_x \leq 10$ мм) при $\zeta = 180^\circ$. Середні значення кутів атаки в точці з $R_x = 1,5$ мм складають $\chi = -30^\circ$, а в точці з $R_x = 10,0$ мм вони складають $\chi = 5^\circ$.

– розмах R_x кутів атаки $\Delta\chi$ за повний оберт свердла для кожної точки складає приблизно 60° ;

– зміна величини швидкості кругової подачі (рис. 2, г) від $V_s = -V_{s0}$ до нуля збільшує мінімальні кути на $2-3^\circ$ і на таку ж величину зменшує максимальні кути атаки. По-іншому, зменшення абсолютної величини від'ємної швидкості кругової подачі сприяє вирівнюванню значень кутів атаки по довжині головної різальної кромки.

Залежність кутів атаки на робочій стороні гвинтового рівчака свердла від його кутового положення при круговій подачі представлена на рис. 3.

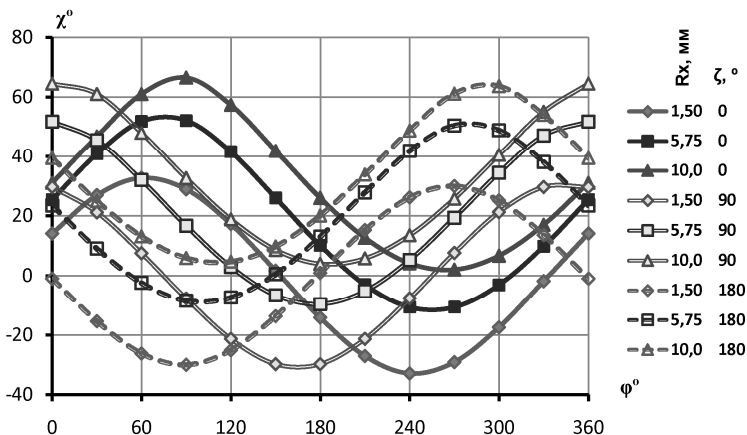


Рис. 3. Залежність кутів атаки на передній поверхні свердла від його кутового положення ($V_s = -V_{s0}$, $\alpha = 0^\circ$)

Залежність кутів атаки від кутового положення свердла є періодичною кривою з більшою кривизною в зоні максимальних кутів атаки і з меншою кривизною в зоні з мінімальними кутами атаки. Значення кутів атаки за повний оберт свердла для точок різальної кромки, що знаходяться ближче до осі свердла ($R_x \approx 1,5 \div 3,5$ мм) до $\varphi = 180^\circ$ є від'ємними, а з $\varphi > 180^\circ$ до $\varphi = 360^\circ$ – додатними. Тобто половину оберту свердла ці точки знаходяться в "тіньовій зоні". В середніх точках різальної кромки ($R_x \approx 4,5 \div 8,0$ мм) третину оберту кути атаки є від'ємними, а дві третини – додатними. Периферійні точки свердла ($R_x \approx 8,0 \div 10,0$ мм) повний оберт свердла знаходяться в зоні виключно додатних кутів. При порівнянні значень кутів атаки в точках, які лежать на гвинтовій лінії з параметром $R_x = 1,5$ мм зі значеннями, які лежать на гвинтових лініях з параметрами $R_x = 5,75$ мм та $R_x = 10,0$ мм встановлено, що дане явище пов'язане зі швидкістю кругової подачі, а отже і з сумарною швидкістю різання.

При від'ємній швидкості кругової подачі $V_s = -V_{s0}$ значення кутів атаки знаходяться в діапазоні $\chi = -33^\circ \div -67^\circ$.

Криві з різними значеннями кутів розвороту профілю ζ є кривими зсунутими одна відносно одної на відповідні кути $\Delta\varphi$. У табл. 1 наведені дані про координати максимумів (φ_{\max} , χ_{\max}) та мінімумів (φ_{\min} , χ_{\min}), зсуви максимумів $\Delta\varphi_{\min}$ та мінімумів $\Delta\varphi_{\max}$ один відносно одного вздовж осі φ в діапазоні кутів розвороту профілю $\zeta = 0^\circ\text{--}80^\circ$ для точки головної різальної кромки з параметром $R_x = 10,0$ мм. При зростанні кута розвороту профілю ζ розмах кутів атаки R_χ зменшується з $R_\chi = 64,7^\circ$ до $R_\chi \approx 60,0^\circ$.

Таблиця 1

Екстремальні значення $\chi(\varphi)$ для точки $R_x = 10,0$ мм

при $V_S = -V_{S0}$

χ , °	0,0	30,0	60,0	90,0	120,0	150,0	180,0
h, мм	0,0	9,1	18,1	27,2	36,3	45,3	54,4
φ_{\min} , °	264,2	238,2	212,3	186,7	161,3	136	110,7
φ_{\max} , °	86,5	59,5	31,5	7,3	343,0	316,3	291,3
χ_{\max} , °	66,63	66,02	65,37	65,01	64,87	64,23	64,3
χ_{\min} , °	1,95	2,71	3,35	3,86	4,22	4,42	4,45
$\Delta\varphi_{\min}$, °	-	-26,0	-25,9	-25,6	-25,4	-25,3	-25,3
$\Delta\varphi_{\max}$, °	-	-27,0	-28,1	-24,2	-24,3	-26,7	-25,0

Значення кутів атаки на робочій стороні гвинтового ривчака при певному куті розвороту профілю ζ співпадають з кутами атаки на головній різальній кромці після переміщення свердла вздовж осі X_5 на величину $T_x = h \cdot \zeta \cdot \cos \xi$ і повороту на кут $\varphi = \zeta$. І взагалі переміщення свердла по осі X_5 на величину порівнянню з довжиною робочої частини свердла призводить до зміни кутів атаки, аналогічних тим, які відбуваються при зміні кутів розвороту профілю.

Залежність кутів атаки від швидкості кругової подачі. На рис. 4 представлені залежності зміни кутів атаки від кутового положення свердла при різних швидкостях кругової подачі та їх напрямках.

Аналіз отриманих результатів показує, що:

– незалежно від швидкості кругової подачі в точках головної різальної кромки поблизу осі свердла кути атаки майже однакові. Про це свідчить майже повний збіг кривих при $R_x = 1,5 \text{ мм}$;

– збільшення величини додатної швидкості кругової подачі приводить до зменшення значень кутів атаки та їх вирівнюванню по довжині головної різальної кромки;

– збільшення абсолютної величини від'ємної швидкості кругової подачі приводить до збільшення кутів атаки та нерівномірності розподілу їх значень вдовж головної різальної кромки. При цьому при певних швидкостях за повний оберт свердла в середній частині різальної кромки ($V_S/V_{S0} = -5$) та в периферійній частині ($V_S/V_{S0} = -1$) кути атаки виключно додатні;

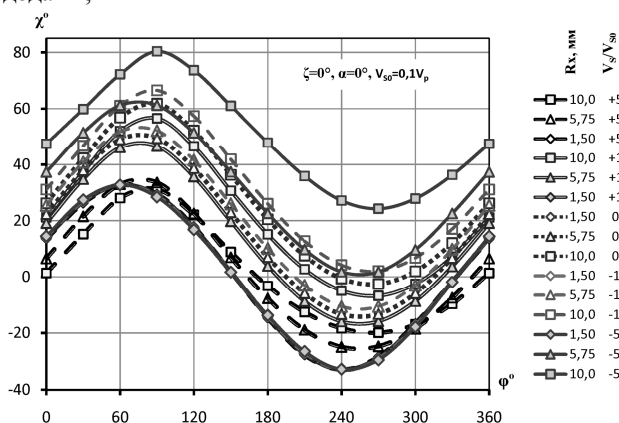


Рис. 4. Залежності зміни кутів атаки від кутового положення свердла при різних швидкостях кругової подачі та їх напрямках:

при швидкості кругової подачі $V_S = -5 \cdot V_{S0}$ значення кутів атаки не

знаходяться в діапазоні $\chi = -33^\circ \div 80^\circ$, а при $V_S = +5 \cdot V_{S0}$ –

в діапазоні $\chi = -33^\circ \div 34^\circ$

При сталій величині R_{cp} кути атаки від величини V_P не залежать, оскільки в цьому випадку вектори \vec{V}_P кожної точки свердла мають постійний напрямок.

Сумарна швидкість різання. При цілеспрямованому впливі на величини кутів атаки за рахунок вибору співвідношення складових сумарної швидкості різання (в т. ч. і їх напрямків) потрібно мати на увазі, що відхилення швидкості різання від заданої не повинне

перевищувати 5 % [3].

На рис. 5 представлені залежності зміни величин сумарної швидкості різання від величини і напрямку швидкості кругової подачі за оберт свердла.

Для порівняння на графіках наведені залежності швидкості головного руху від кута повороту свердла. Швидкість головного руху точок головної різальної кромки не є постійною. Вона є мінімальною для всіх точок кромки, коли вона знаходиться в площині, перпендикулярній X_5Y_5 , тобто при кутах $\varphi = 0^\circ$, $\varphi = 180^\circ$ (або $\zeta = 0^\circ$, $\zeta = 180^\circ$). Максимальне відхилення від $V_p = 5$ м/с складає 7,4 %, а мінімальне – 5 %.

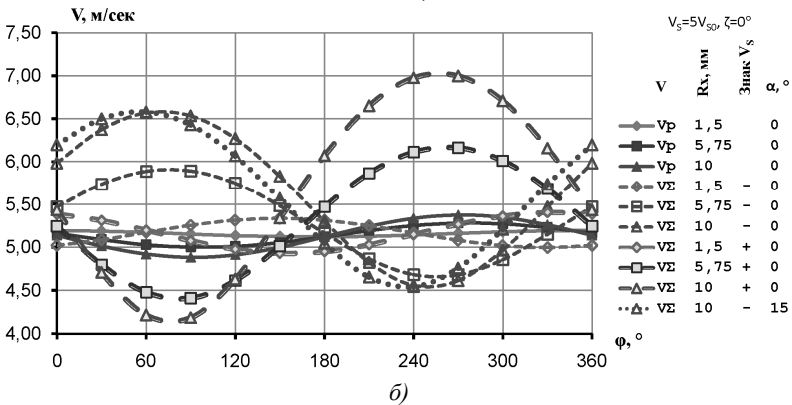
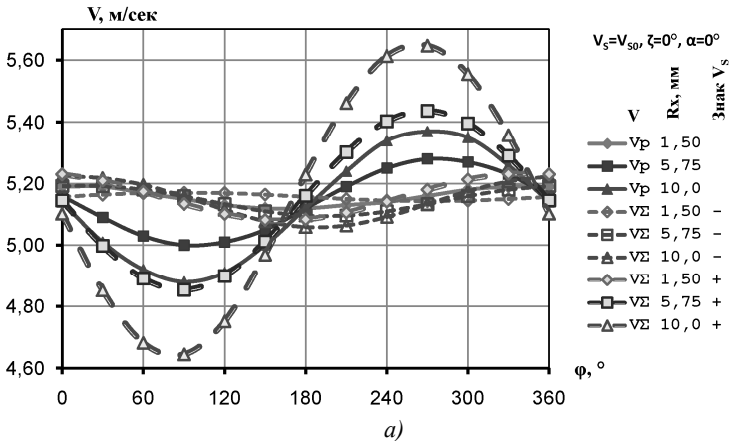


Рис. 5. Залежності зміни величин сумарної швидкості різання від величини і напрямку швидкості кругової подачі за оберт свердла

Якісна характеристика сумарної швидкості різання за оберт свердла має однаковий вигляд при різних напрямках вектора швидкості кругової подачі. Різниця полягає в двох моментах:

- додатний і від’ємний напрямки вектора швидкості кругової подачі змінюють величину сумарної швидкості різання у протифазі;
- за абсолютною величиною зміна сумарної швидкості різання більша при додатному напрямку вектора швидкості кругової подачі: при $V_s/V_{s0} = -1$ відхилення $\Delta_{V_{\Sigma \max}} \approx 4,5\%$, $\Delta_{V_{\Sigma \min}} \approx 0\%$; при $V_s/V_{s0} = +1$ відхилення $\Delta_{V_{\Sigma \max}} \approx 13\%$, $\Delta_{V_{\Sigma \min}} \approx 9,5\%$; при $V_s/V_{s0} = -5$ відхилення складають $\Delta_{V_{\Sigma \max}} \approx 31,4\%$, $\Delta_{V_{\Sigma \min}} \approx 9,0\%$; при $V_s/V_{s0} = +5$ відповідно $\Delta_{V_{\Sigma \max}} \approx 40,0\%$, $\Delta_{V_{\Sigma \min}} \approx 17,6\%$.

Залежність кутів атаки від кута розвороту свердла α . На рис. 6 представлено залежності зміни кутів атаки на головній різальній кромці від величини і знаку кута розвороту свердла α в площині X_5Y_5 за оберт свердла при відсутності кругової подачі.

Додатний кут розвороту свердла призводить до зсуву кривої $\chi(\varphi)$ ліворуч на кут α , а від’ємний – праворуч на кут α . Значення максимумів та мінімумів майже не змінюються. Це підтверджується також аналогічним зміщенням залежності сумарної швидкості різання від величини і напрямку швидкості кругової подачі за оберт свердла (рис. 5, б) при $\alpha = -15^\circ$.

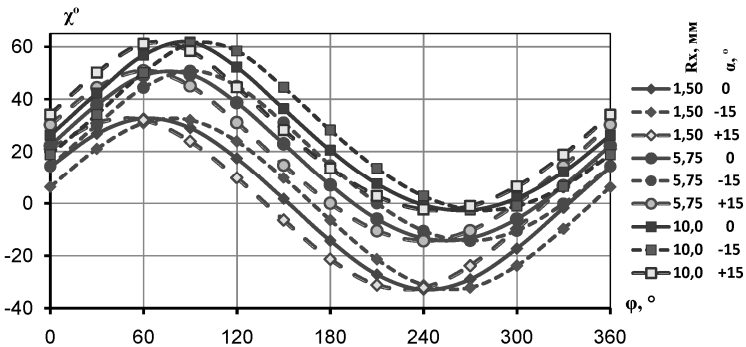


Рис. 6. Залежності зміни кутів атаки на головній різальній кромці від величини і знака кута розвороту свердла α ($\zeta = 0^\circ$, $V_s = 0$)

Сукупний вплив швидкості кругової подачі та кутів розвороту. На рис. 7 представлено залежності кутів атаки на головній різальній кромці від швидкості кругової подачі та кута розвороту свердла α . Залежність від швидкості кругової подачі є майже лінійною. Нахил кожної із ліній залежить від відстані R_x точки різальної кромки до осі свердла (для більших відстаней кут нахилу більший), кута розвороту свердла (додатні кути зменшують кут нахилу порівняно з нульовим, а від'ємні – збільшують) та кута φ повороту свердла. Остання залежність має складний періодичний характер і для прикладу на рис. 8 наведена залежність кутового коефіцієнта прямих, які апроксимують лінії $\chi(V_s)$, від кутового положення свердла для точки з координатою $R_x = 5,75$ мм, $V_s = -5 \cdot V_{s0}$.

Тут теж при наявності кута розвороту свердла спостерігається аналогічний зсув значень залежності.

Оскільки на рис. 7 наведені залежності для початкового кутового положення ($\varphi = 0^\circ$), то відповідно до залежності $\chi(\varphi)$ (рис. 6) у діапазоні кутів $\varphi = 0^\circ \div 60^\circ$ додатний кут α призводить до збільшення кутів атаки (рис. 7), а від'ємний – навпаки.

Вплив розмірів "кільцевої ванни". На рис. 9, а представлені залежності зміни кутів атаки від величини середнього радіуса "кільцевої ванни" для точки $R_x = 10$ мм головної різальної кромки при $\zeta = 0^\circ$, $\alpha = 0^\circ$, $V_s = 0$ за повний оберт свердла. За повний оберт свердла в діапазонах кутів обертання від $\varphi = 0^\circ$ до $\varphi = 90^\circ$ і від $\varphi = 300^\circ$ до $\varphi = 360^\circ$ кути атаки зменшуються при зростанні середнього радіуса "кільцевої ванни, а в діапазоні від $\varphi = 120^\circ$ до $\varphi = 300^\circ$ – зменшуються (рис. 9, б). В діапазоні $R_{cp} = 100 \div 250$ мм зміна кутів атаки проходить досить інтенсивно – на $8 \div 12^\circ$, а діапазоні $R_{cp} = 250 \div 400$ мм – всього на $3 \div 5^\circ$. Така ж тенденція зміни кутів атаки ($3 \div 5^\circ$) спостерігається і при $R_{cp} > 500$ мм.

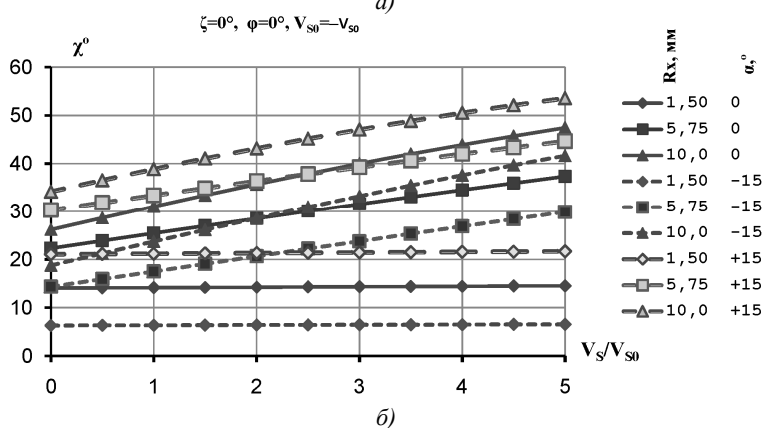
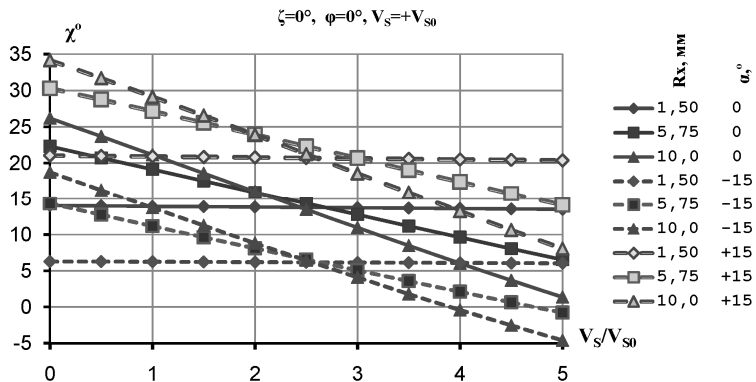


Рис. 7. Залежності зміни кутів атаки на головній різальній кромці від швидкості кругової подачі та кута розвороту свердла α ($\zeta = 0^\circ, \varphi = 0^\circ$): а) $V_{S0} = +0,1 \cdot V_p$; б) $V_{S0} = -0,1 \cdot V_p$

Таким чином, при збільшенні R_{cp} спостерігається наближення кривих $\chi(R_{cp})$ до кривої $\chi_{\varphi_{cp}}(R_{cp})$, яка є середнім значенням кутів атаки за оберт свердла. Для точки різальної кромки $R_X = 10$ мм середні значення знаходяться в діапазоні $\chi_{\varphi_{cp}} = 25,4 \div 26,4^\circ$.

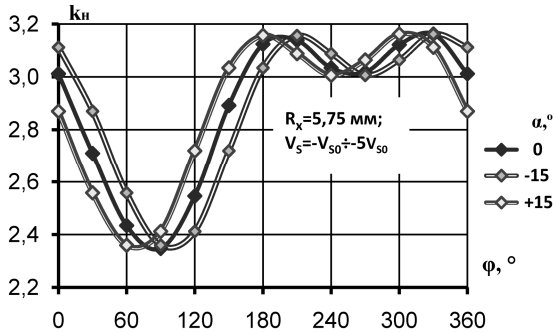
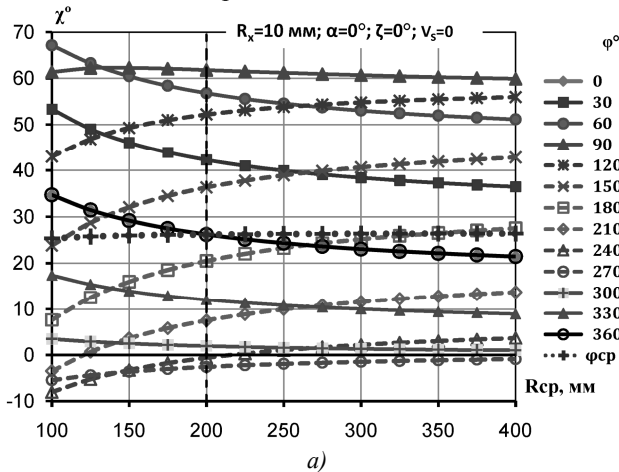


Рис. 8. Залежності кутових коефіцієнтів прямих, які апроксимують лінії $\chi(V_s)$, від кутового положення свердла

Така ж тенденція спостерігається і для інших точок головної різальної кромки. На рис. 9, б представлені криві $\chi(\varphi)$ для трьох характерних точок головної різальної кромки за оберт свердла при трьох значеннях середнього радіуса кільцевої ванни 100 мм, 200 мм та 400 мм. При збільшенні R_{cp} спостерігається зміщення екстремумів ліворуч і їх наближення до середнього значення.



a)

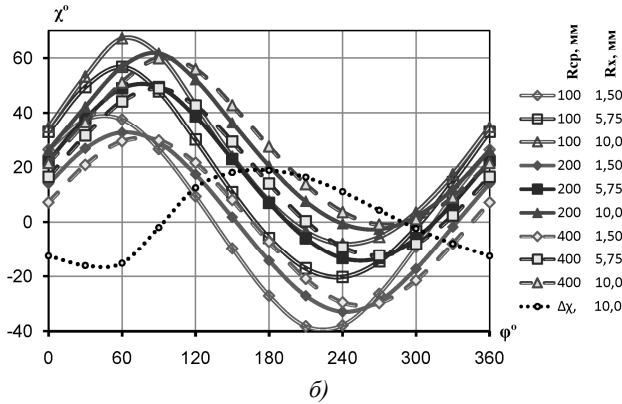


Рис. 9. Залежності кутів атаки від величини середнього радіуса "кільцевої ванни": а) для точки $R_{\chi} = 10 \text{ мм}$;

б) для точок $R_{\chi} = 1,5 \text{ мм}$, $R_{\chi} = 5,75 \text{ мм}$, $R_{\chi} = 10,0 \text{ мм}$

Висновки:

- порівняно з оптимальними значеннями кутів атаки (30° [2, 3]) в найбільш несприятливих умовах знаходяться точки головної різальної кромки (і відповідної їм частини гвинтової передньої поверхні), які розташовані ближче до серцевини свердла – значну частину повного оберту свердла навколо своєї осі ця частина робочої сторони гвинтового ривчака знаходиться в "тіньовій зоні";

- в найбільш сприятливих умовах знаходяться периферійні точки різальної кромки та робочої сторони гвинтового ривчака свердла. Більшу частину повного оберту свердла навколо своєї осі кути атаки на цій частині поверхні мають додатні значення. Середні значення цих кутів близькі до оптимальних;

- зміна величини та напрямку швидкості кругової подачі або, по-іншому, зміна співвідношення швидкостей головного руху та кругової подачі при підтриманні на сталому рівні сумарної швидкості різання дозволяє в певних межах цілеспрямовано змінювати величини кутів атаки на оброблюваних поверхнях;

- розворот свердла не впливає на значення кутів за повний його оберт. Залежно від знака кута розвороту має місце зсув значень кутів атаки: ліворуч при додатному куті розвороту і праворуч – при від'ємному;

- збільшення середнього діаметра "кільцевої ванни" призводить до зменшення відхилення кутів атаки від їх середнього значення за оберт

свердла. Середнє значення кутів атаки за оберт свердла є величиною, яка мало залежить від середнього діаметра "кільцевої ванни".

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Гейчук В.М.* Роторні верстати для магнітно-абразивної обробки на базі магнітної системи типу "кільцева ванна": кінематика обробки спіральних свердел // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2008. – № 2(50). – Ч. 2. – С. 94–101.
2. Патент України № UA 25441A. Спосіб магнітно-абразивної об'ємної обробки / В.С. Майборода, В.М. Гейчук, О.В. Степанов. МПК В 24 В 31/112; Бюл. № 6, 15.12.1998.
3. *Майборода В.С.* Основи створення і використання порошкового магнітно-абразивного інструменту для фінішної обробки фасонних поверхонь: Дисс... док. техн. наук. – Київ, 2001. – 404 с.
4. *Родин П.Р.* Металлорежущие инструменты: Учебник для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – К.: Выща шк., Головное изд-во, 1986. – 455 с.

ГЕЙЧУК Володимир Миколайович – кандидат технічних наук, доцент Національного технічного університету України “КПІ”.

Наукові інтереси:

- кінематика обробки спіральних свердел.

Подано 20.20.2008