

УДК 621.923

**В. Майборода¹, докт. техн. наук; Д. Джулій¹;
І. Ткачук¹; О. Беляєв², доктор-інженер**

¹Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»

²ZOM Oberflächenbearbeitung GmbH, Магдебург, Німеччина

МАГНІТНО-АБРАЗИВНЕ ОБРОБЛЕННЯ КІНЦЕВОГО РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ В УМОВАХ ВЕЛИКИХ МАГНІТНИХ ЩІЛИН ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Резюме. Досліджено особливості магнітно-абразивного оброблення кінцевого різального інструменту на прикладі кінцевих фрез $\varnothing 10$, $\varnothing 12$ та $\varnothing 14$ мм і розгортках $\varnothing 8$ мм, виготовлених із інструментальної сталі, при використанні відновлювальних елементів за умов їх оптимального розташування в зоні оброблення. За оптимальних умов базування шорсткість поверхні знижується до $Ra=0,16-0,2$ мкм, ступінь наклепу робочої поверхні інструменту складає $0,14-0,15$ відносних одиниць, відбувається активне кероване формування різальних кромок без концентраторів напружень із заданою величиною радіуса округлення в діапазоні від $10-11$ мкм до $30-35$ мкм.

Ключові слова: магнітно-абразивне оброблення, магнітно-абразивний інструмент, відновлювальний елемент, кінцевий різальний інструмент.

V. Maiboroda, D. Dzhulii, I. Tkachuk, O. Byelyayev

MAGNETIC-ABRASIVE MACHINING OF END-CUTTING TOOL IN A LARGE MAGNETIC GAPS WITH USING THE RESTORE ELEMENTS

Summary. To ensure corresponding quality of end-cutting tools it is necessary during the finishing steps of their production to use modern methods of treatment, which combine in one simultaneous strengthening, polishing and purposeful formation of microgeometric characteristics of work surfaces and form of radiuses of rounding cutting edge. Such method is magnetic-abrasive machining in a large magnetic working areas, it increases the working capacity and reliability of the cutting tool. One of the conditions for the effectiveness of this process is a continuous renovation of magnetic-abrasive tool, which is formed and re-formed in the working areas during the treatment. To provide this condition it is necessary to use additional restore shaft-form elements in the technological operations of magnetic-abrasive machining.

In the work experimental research peculiarities of magnetic-abrasive machining of the end cutting tools by example end mills $\varnothing 10$, $\varnothing 12$ and $\varnothing 14$ mm and reamers $\varnothing 8$ mm, made of tool steel with using the restore elements under the condition of their optimal basing in the working area are presented.

Under the optimal conditions of basing the surface roughness decreases to $Ra=0,16-0,2$ mkm, which testifies the essential value of tangential cutting force, arising at the interaction of magnetic-abrasive tool with machined surfaces and on the importance of maintaining constant shape and density of the magnetic-abrasive tool on volume of the working area in the condition of active mixing; the degree of hardening of the working surface of the instrument is $0,14-0,15$ relative units depending on the angle of inclination of the parts in relation to the direction of rotation of the tool in circular-type working area, which determines the degree of the normal component of the force impact of magnetic-abrasive tool on the surface of parts. Active-controlled

formation of cutting edges without stress concentrator with a given radius of rounding in the range from 10 – 11 mkm to 30 – 35 mkm is taken place.

Key words: *Magnetic-abrasive machining, magnetic-abrasive tool, restore element, end-cutting tool*

Умовні позначення:

PI – різальний інструмент;

PK – різальна кромка;

MAO – магнітно-абразивне оброблення;

MAI – магнітно-абразивний інструмент;

p – кут нахилу осі інструмента відносно до площини кільцевої ванни;

q – кут розташування відносно дотичної до кола обертання навколо осі кільцевої ванни.

Постановка проблеми. Забезпечення відповідної якості кінцевого PI значною мірою пов'язано із застосуванням на фінішних стадіях його виготовлення сучасних методів оброблення, які поєднують у собі одночасне його полірування, зміцнення й цілеспрямоване формування мікрогеометричних характеристик як робочих поверхонь, так форми і радіусів округлення PK.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останнім часом приділяється суттєва увага формуванню наперед визначеної форми PK із метою підвищення працездатності й надійності PI [1, 2]. Одним із перспективних методів фінішного оброблення PI є метод магнітно-абразивного оброблення, що виконується в умовах великих магнітних щілин [3, 4]. Попередні дослідження процесу MAO кінцевого PI на установках типу кінцева ванна [3, 5 – 9] довели можливість ефективного застосування цього методу оброблення і показали важливість забезпечення при MAO безперервного відновлення магнітно-абразивного інструменту, який формується і переформовується в робочих зонах у процесі оброблення. Результати отримані при MAO твердосплавних фрез [8] показали доцільність використання в технологічній операції MAO в кільцевій ванні додаткових елементів, що забезпечують безперервне відновлення форми і властивостей MAI. Проте практично відсутні дослідження процесу MAO кінцевого інструменту з інструментальної сталі з використанням відновлювального елемента, які враховують умови базування виробів у робочих зазорах під час оброблення.

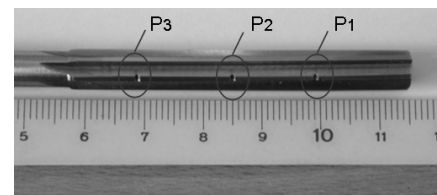
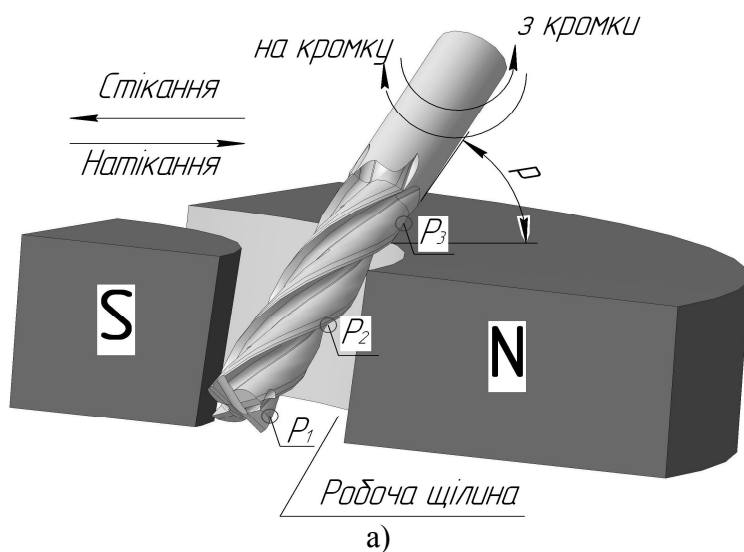
Мета роботи – дослідження особливостей магнітно-абразивного оброблення кінцевого різального інструменту на прикладі кінцевих фрез, розгортки із використанням відновлювальних елементів за умов їх оптимального розташування в зоні оброблення.

Постановка завдання. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити завдання, пов'язані з експериментальними дослідженнями процесу MAO кінцевих фрез і розгортки, виготовлених з інструментальних сталей на установці з кільцевим розташуванням робочих щілин за умов використання відновлювальних елементів при їх різноманітному розташуванні відносно площини обертання. Визначити вплив умов оброблення й базування як оброблювальних виробів, так і відновлювальних елементів на кінетику зміни шорсткості робочих поверхонь, характер зміни величини радіусів округлення різальних кромки і ступінь наклепу робочих поверхонь PI.

Умови проведення експериментальних досліджень. Експериментальні дослідження виконували на розгортках Ø8, кінцевих фрезах Ø10, Ø12 та Ø14 мм з довжиною робочої частини 50 – 60 мм виготовлених з інструментальних сталей. MAO виконували на експериментальному верстаті [3, 10], який забезпечує можливість

обертання виробів з реверсом навколо осі кільцевої ванни з регульованою швидкістю в діапазоні 20 – 500 об/хв, реверсивного обертання інструмента навколо власної осі зі швидкістю 20 – 300 об/хв, можливість заданого кутового базування інструмента в робочій зоні [11] як відносно площини кільцевої ванни, так і відносно напрямку обертання навколо кільцевої ванни в діапазоні кутів 20° – 90° . В якості відновлювального МАІ елемента використовували протилежно встановлений стержень оптимальної форми [6]. Оброблення виконували магнітно-абразивним порошком Полімам-Т з розміром зерен 200/160 мкм із використанням олійної ЗОМТС марки АСФОЛ [2, 4]. З урахуванням реологічних властивостей МАІ, який формується в робочих зонах у процесі MAO різального інструменту, кут нахилу осі інструмента відносно площини кільцевої ванни ρ дорівнював 40° та 60° (рис. 1а), а кут розташування відносно дотичної до кола обертання навколо осі кільцевої ванни q дорівнював 10° – 15° . У процесі MAO контролювали кінетику зміни шорсткості на задній поверхні різального інструменту. Зміну величини радіуса округлення різальних кромки інструменту контролювали в зонах, які під час MAO розташовані в нижній – поблизу точки P_1 , середній – поблизу точки P_2 та верхній – поблизу P_3 частинах робочих щілин (рис. 1).

Величину радіуса округлення вимірювали на оптичному приладі MikroCad. Додатково контролювали поверхневу твердість PI до і після повного циклу MAO, який складав 120 с – час, достатній для забезпечення ефективного MAO [3, 5, 12]. Оброблення виконували при величині магнітної індукції у вільних робочих щілинах 0,24 Тл у режимі “стікання” [5, 8]. Варіювали напрямки обертання інструменту навколо власної осі зі швидкістю 200 – 250 об/хв. А саме, виконували MAO при обертанні за годинниковою стрілкою навколо власної осі, коли різальна кромка інструменту натікає на магнітно-абразивний порошок, сформований в МАІ – оброблення “на кромку”, та утворюється додатковий тиск з боку МАІ на кромку, тобто збільшується нормальна складова притиснення МАІ до різальної кромки і навпаки – за умов стікання порошкового МАІ при обертанні деталей проти годинникової стрілки навколо власної осі з кромки – оброблення “з кромки”.



b)

Рисунок 1. Схематичне розташування різального інструменту в робочих щілинах кільцевої ванни при MAO (a) і контрольні зони на робочих поверхнях (b)

Figure 1. Schematic position of the cutting tool in the working gaps of circular-type working area at the MAM (a) and control zones on the working surfaces (b)

У вихідному стані (до MAO) шорсткість R_a передньої та задньої робочих поверхонь на циліндричній частині інструменту складала 0,63 – 0,7 мкм, поверхнева твердість на задній поверхні знаходилася в діапазоні 7 – 7,5 ГПа, радіус округлення різальних кромки було доведено до рівня 10 – 11 мкм. Через кожні 30 с оброблення контролювали зміну шорсткості робочих поверхонь та радіуса округлення різальних кромки по довжині різального інструменту в зонах поблизу контрольних точок, які розташовувалися під час MAO в нижній, середній та верхній частинах робочих щілин магнітної системи установки (рис. 1). Зазначимо, що експериментальні результати зі зміни величин параметра R_a та радіусів округлення різальної кромки, отримані на фрезах, зазначених вище діаметрів, і на розгортках практично не відрізнялися. Розкид експериментальних даних не перевищував 4 – 6%.

Результати дослідження. На рис. 2 наведено кінетику зміни шорсткості поверхні при кутах нахилу осі інструменту відносно площини кільцевої ванни 40° та 60° як при використанні відновлювального MAI елемента, так і без нього.

Показано, що при куті нахилу як фрез, так і розгортки $p=60^\circ$ вплив дії відновлювального елемента на шорсткість обробленої поверхні менший, ніж при MAO з кутом $p = 40^\circ$. Встановлено, що при використанні відновлювального елемента має місце значне зниження параметра R_a до 0,2 – 0,16 мкм за 60 – 120 с оброблення. Така різниця в отриманих результатах свідчить про наявність суттєвого значення тангенціальної складової сил різання, що виникають при взаємодії магнітно-абразивного інструмента з оброблюваними поверхнями і важливість підтримання незмінної форми та щільності MAI по усьому об'єму робочої зони за умов його активного перемішування [3, 13]. У випадку розташування деталей під кутом $p = 60^\circ$ менш активне зниження шорсткості робочих поверхонь пояснюється тим фактом, що магнітно-абразивний порошок затримується в зонах канавок фрез та розгортки і таким чином утворює в них своєрідні зони зі зниженою активністю оброблення, аналогічні тіньовим зонам [3, 14].

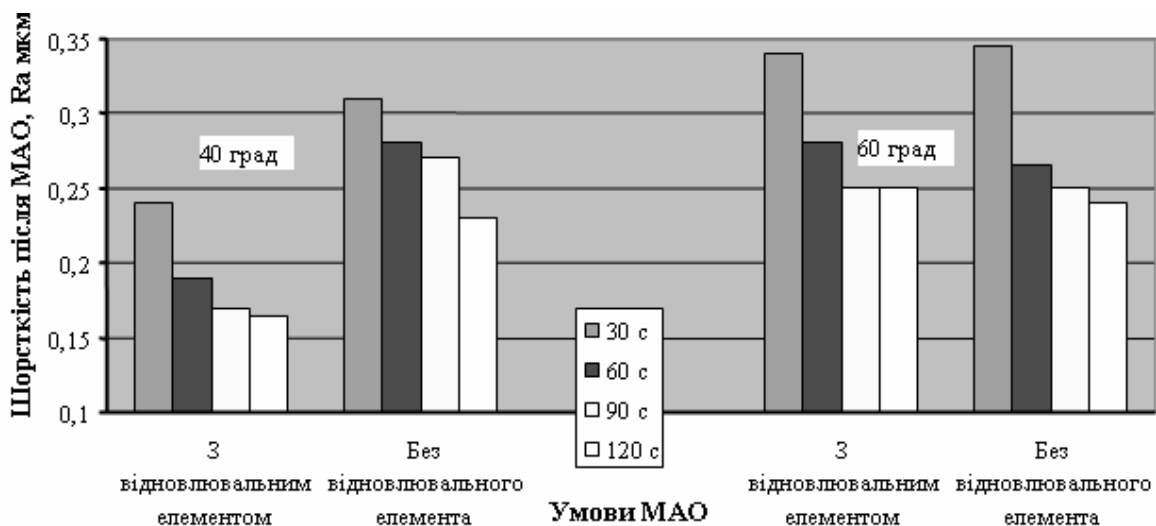


Рисунок 2. Залежність шорсткості поверхні різального інструменту при МАО від умов магнітно-абразивного оброблення при різній тривалості оброблення

Figure 2. Dependence of the surface roughness of the cutting tool at MAM from conditions of the magnetic-abrasive machining under different duration of machining

Аналіз зміни ступеня наклепу поверхневих шарів виробів після циклу МАО показав, що важливими є не тільки рівномірність щільності МАІ по висоті магнітної щілини, а й кут нахилу деталей відносно напрямку обертання інструменту в кільцевій ванні, який визначає ступінь нормальної складової силового впливу МАІ на поверхню деталей. Розрахунки нормальної й тангенціальної складових інтенсивностей оброблення при МАО, виконані за методикою, наведеною в [11, 15], показали, що для кута нахилу $\rho = 40^\circ$ відношення інтенсивності впливу від нормальної складової до інтенсивності від тангенціальної складають 0,73, що є достатнім для забезпечення ефективного процесу МАО у великих щілинах, а для $\rho = 60^\circ$ зазначене відношення 0,49 – недостатнє [11, 13, 15, 16].

При обробленні деталей, розташованих під кутом $\rho = 40^\circ$ без відновлювального елемента, відбувається нерівномірне вздовж осі різального інструменту оброблення як за величиною шорсткості робочих поверхонь, так і за ступенем зміцнення його поверхневого шару. Якщо характер зміни параметра Ra вздовж осі деталей при МАО як з використанням відновлювального елемента, так і без нього було детально досліджено в [6, 8, 10, 17], то характер зміни ступеня наклепу поверхневих шарів виробів не досліджувався. Окремі результати, наведені в [3, 10], явно недостатні для забезпечення рівномірного оброблення стрижневих виробів і кінцевого інструмента.

Виконані дослідження зміни поверхневої твердості як фрез, так і розгортки показали, що в зоні біля точки P_3 наклеп відсутній у середній частині – в зоні P_2 відповідає даним, наведеним на рис. 3, і в нижній частині щілини складає 0,08 – 0,11 залежно від ступеня витіснення МАІ оброблювальною деталлю в нижню частину робочої зони. Ступінь витіснення залежить від типу оброблюваної деталі, її конструкції, форми та напрямку обертання навколо власної осі. Відзначимо, що на величину шорсткості й ступінь зміцнення поверхневого шару інструменту при МАО напрямок обертання навколо власної осі деталей суттєвого впливу не має.

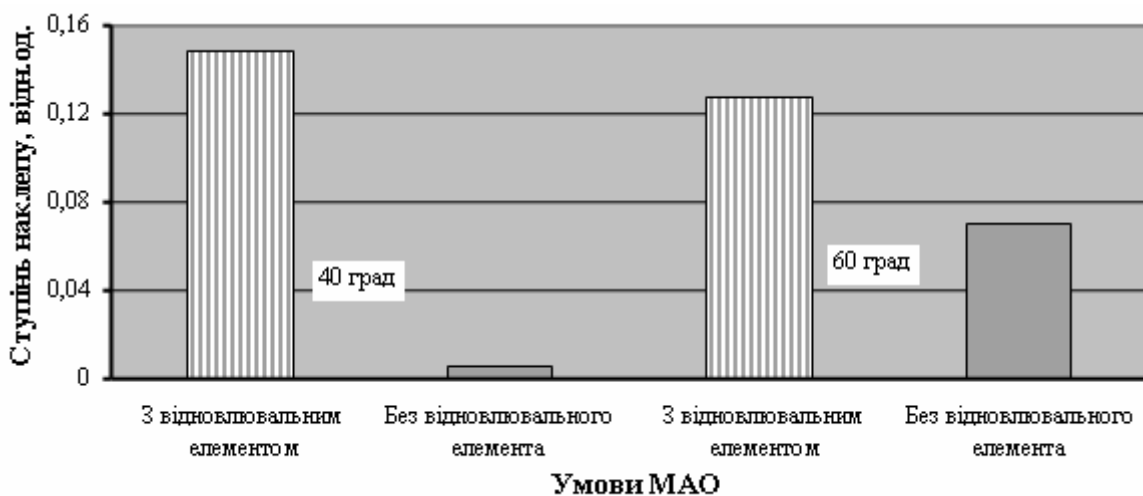


Рисунок 3. Залежність ступеня наклепу поверхневого шару різального інструменту при МАО від умов магнітно-абразивного оброблення

Figure 3. The dependence of the degree of hardening of the surface layer of the cutting tool at MAM from conditions of the magnetic-abrasive machining

Особлива увага приділялась особливостям формування радіусів округлення різальних кромки інструменту в процесі MAO. Дослідження виконували на різальному інструменті при його магнітно-абразивному обробленні в режимі “стікання” [5, 8] з відновлювальним елементом і без його застосування зі зміною напрямку обертання виробів навколо власної осі. Отримані результати за величиною радіусів округлення різальних кромки у контрольних зонах уздовж осі P1 (рис.1) наведено на рис. 4.

Показано, що активний процес формування радіусів різальних кромки – їх округлення відбувається при кутах нахилу P1 до площини кільцевої ванни $p = 40^\circ$. У випадку MAO без відновлювального елемента округлення РК має місце в зонах робочих щілин з підвищеною щільністю MAI – нижній частині робочих щілин, зону, в яку під час оброблення відбувається витіснення основної маси порошку. Застосування відновлювального елемента при MAO в умовах великих магнітних щілин дозволяє досягти відносно рівномірне округлення різальних кромки уздовж осі інструменту й по висоті робочих зон магнітної системи верстата.

Швидкість округлення РК у верхній, нижній і середній частинах робочих щілин при різних кутах базування деталей із використанням відновлювального елемента й без його застосування наведено в таблиці 1. Показано, що для забезпечення рівномірного округлення різальних кромки на циліндричній частині кінцевого різального інструменту вздовж його осі доцільним є базування інструменту в робочих зонах верстатів із урахуванням основних вимог щодо реалізації ефективного процесу MAO [13], реологічних властивостей MAI [3] з використанням відновлювальних стержневих елементів. Встановлено, що середня швидкість мікроокруглення різальних кромки кінцевого P1 з інструментальних сталей складає 0,178 мкм/с при використанні відновлювальних елементів і майже ніж в 3 рази більша за умов без забезпечення відновлення форми і властивостей MAI відновлювальними елементами [6, 8, 10].

З аналізу отриманих результатів встановлено, що формування при MAO гострих кромки на деталях з напіввідкритими поверхнями, до яких можна віднести кінцевий різальний інструмент, доцільно виконувати при їх обертанні навколо власної осі за умов оброблення «з кромки» – стікання магнітно-абразивного порошку, сформованого у робочих щілинах в магнітно-абразивний інструмент, з гострих різальних кромки з метою зменшення вірогідності утворення малорухомих скупчень порошку при MAO в стружковідвідних канавках.

Таблиця 1.

Швидкість зміни радіусів округлення різальних кромки інструменту при MAO в різних умовах, мкм/с

Умови MAO		Величина кута нахилу P1 – p	
Зона розташування РК в робочій щілині верстата	Напрямок обертання P1 навколо власної осі	40°	60°
		<i>З відновлювальним елементом</i>	
		<i>Без відновлювального елемента</i>	
Нижня частина (в районі т. P1)	«З кромки»	0,167/0,078	0/0,041
	«На кромку»	0,121/0,11	0,007/0,028

Середня частина (в районі т. P ₂)	«З кромки»	0,224/0,047	0,047/0,034
	«На кромку»	0,152/0,049	0,028/0,033
Верхня частина (в районі т. P ₃)	«З кромки»	0,228/0,038	0,009/0,034
	«На кромку»	0,178/0,043	0,041/0,018

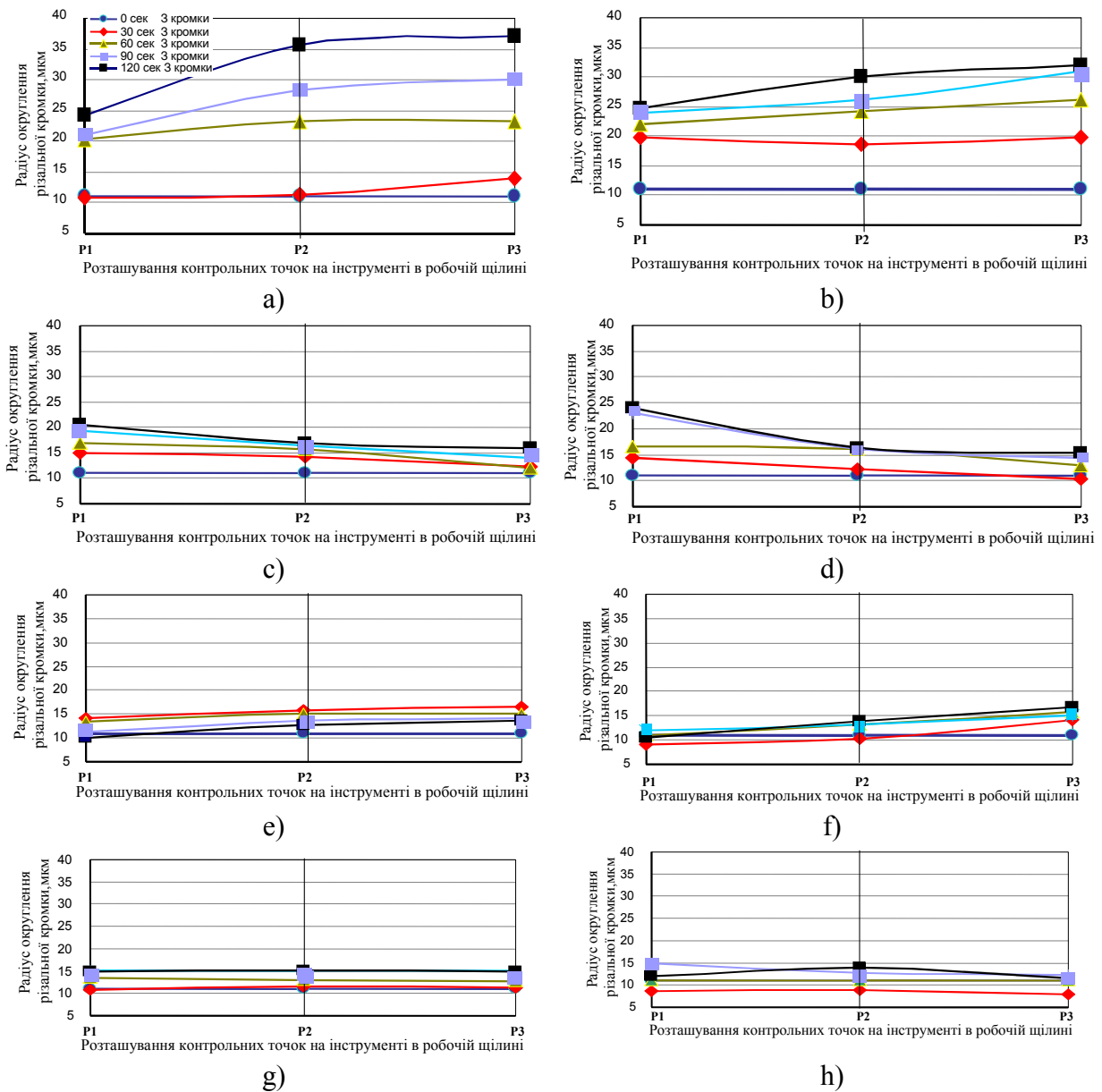


Рисунок 4. Зміна величини радіусів округлення різальних кромки PI в різних по висоті зонах магнітних щілин при різних умовах MAO: а), б), с), д) – кут нахилу деталей відносно площини кільцевої ванни $p=40^\circ$; е), ф), г), h) – $p = 60^\circ$; а), б), е), ф) – MAO з використанням відновлювального елемента; с), д), г), h) – MAO без використання відновлювального елемента; а), с), е), ф) – оброблення "з кромки"; б), д), г), h) – оброблення "на кромку"

Figure 4. Change of the value of the radiuses of rounding of cutting edges CT in different on height zones of magnetic working areas at different conditions of MAM: а) – angle of inclination detail relative to the plane of the circular-type working area $p = 40^\circ$; е), ф), г), h) – $p = 60^\circ$; а), б), е), ф) – MAM with using restore element; с), д), г), h) – MAM without using restore element; а), с), е), ф) – machining " from the cutting edge"; б), д), г), h) – machining " on the cutting edge"

Висновки. Показано ефективність використання відновлювальних елементів за умов оптимального розташування в робочій щілині при MAO кінцевого різального інструменту. MAO розгортки та кінцевих фрез доцільно виконувати при їх обробленні

«з кромки» при базуванні під кутом 40^0 до площини кільцевої ванни. За таких умов шорсткість поверхні знижується до $Ra = 0,16 - 0,2$ мкм, ступінь наклепу робочої поверхні інструменту складає $0,14 - 0,15$ відносних одиниць, відбувається активне кероване формування різальних кромок без концентраторів напружень з заданою величиною радіуса округлення в діапазоні від $10 - 11$ мкм до $30 - 35$ мкм.

Conclusions. The efficiency of the using of restore elements under the conditions of optimal basing in the working area at the MAM of end-cutting tool was shown. MAM of reamers and end mills is reasonable to perform at their machining "from the cutting edge" and at their basing under angle of 40^0 to the plane of the circular-type working area. Under such conditions the surface roughness decreases to $Ra = 0,16 - 0,2$ mkm, the degree of hardening of the working surface of the instrument is $0,14 - 0,15$ relative units, active controlled formation of cutting edges without stress concentrator with a given radius of rounding in the range from $10 - 11$ mkm to $30 - 35$ mkm is taken place.

Список використаної літератури

1. Tikal Franz Schneidkantenpräparation – Ziele, Verfahren und Messmethoden / F. Tikal, R. Bienemann, L. Heckmann: – Kassel universitypress GmbH, Kassel, 2009. – 193 p.
2. Denkena, B. Influence of the cutting edge rounding on the chip formation process: Part 1. Investigation of material flow, process forces, and cutting temperature. / B. Denkena, J. Köhler, Mesfin Sisay Mengesha // *Prod. Eng. Res. Devel.*, 2012. – №6. – P. 329 – 338.
3. Майборода, В.С. Основи створення і використання порошкового магнітно-абразивного інструменту для фінішної обробки фасонних поверхонь [Текст]: дис. ... докт. техн. наук: 05.03.01 : захищ. 05.03.01 : затверджена 11.06.01 / В.С. Майборода. – Київ, 2001. – 404 с.
4. Барон, Ю.М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов [Текст] / Ю.М. Барон. – Л.: Машиностроение, 1986. – 176 с.
5. Vyelyaev, O. Erhöhung der Leistungsfähigkeit von HSS-Spiralbohrern durch Einsatz der magnetabrasiven Bearbeitung. Dissertation Dr.-Ing. – Magdeburg, Germany, 2008. – 149 p.
6. Майборода, В.С. Формирование магнитно-абразивного инструмента в рабочих зонах установок типа “кольцевая ванна” [Текст] / В.С. Майборода, Д.Ю. Джулий, И.В. Ткачук // *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство.* – Вип. 9 (205). – Донецьк: ДонНТУ, 2012. – С. 127 – 133.
7. Степанов, О.В. Оптимізація умов магнітно-абразивного оброблення консольно закріплених деталей [Текст] / О.В. Степанов, В.С. Майборода, В.М. Гейчук // *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. праць.* Вип. 26. – Краматорськ-Київ, 2010. – С. 293 – 298.
8. Майборода, В.С. Эффективность применения при магнитно-абразивной обработке восстанавливающих стержневых элементов [Текст] / В.С. Майборода, Д.Ю. Джулий, И.В. Ткачук // *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: збірник наукових праць.* Вип. 30. – Краматорськ, 2012. – С. 171 – 177.
9. Кінетика формування кромок кінцевого різального інструменту при магнітно-абразивному обробленні в магнітній системі типу “кольцева ванна” [Текст] / В.С. Майборода, В.М. Гейчук, О.С. Клишта, О.А. Беляев // *Процеси механічної обробки в машинобудуванні: збірник наукових праць* – Вип. 7. – 2009. – С. 131 – 160.
10. Майборода, В.С. Магнитно-абразивная обработка деталей с консольным креплением на установке типа кольцевая ванна [Текст] / В.С. Майборода, В.М. Гейчук // *Машиностроение и техносфера XXI века Сборник трудов XVII Междунар. научно-техн. конф. Том 2.* – Севастополь, 2010. – С. 130 – 134.
11. Майборода, В.С. Аналіз умов магнітно-абразивного оброблення багатограничних непереточуваних пластин при їх доцільному розташуванні в робочих зонах установки типу кільцева ванна [Текст] / В.С. Майборода, Д.Ю. Джулий // *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету ім. М. Остроградського.* – 2008. – №1(48). – С. 27 – 31.
12. Vyelyaev, O. Einige Aspekte der Schneidkantenverrundung Bohrwerkzeugen / O. Vyelyaev, D. Hoffmann, J. Pfrommer, V.S. Maiboroda, W.N. Geichuk // *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство.* – Вип. 8 (190). – Донецьк: ДонНТУ, 2011. – С. 72 – 77.

13. Майборода, В.С. Дослідження властивостей магнітно-абразивного інструменту сформованого з сумішей порошків [Текст] / В.С. Майборода //Процеси механічної обробки в машинобудуванні: збірник наук. праць ЖДТУ. – Вип. 6. – 2009. – С. 144 – 159.
14. Степанов, О.В. Исследование процесса формирования магнитно-абразивного порошкового инструмента для обработки деталей сложной геометрической формы [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.06 : защищ. 23.06.97 : затверджена 23.06.97 / Степанов О.В. – Киев, 1997. – 145 с.
15. Майборода, В.С. Кінетика процесу магнітно-абразивної обробки твердосплавних непереточуваних пластин в умовах кільцевої робочої зони [Текст] / В.С. Майборода, Т.М. Капушак // Вісник ЖДТУ – 2004. – №4 (31). – Т1. – С. 57 – 65.
16. Майборода, В.С. Магнітно-абразивна обробка твердосплавних елементів бурових доліт [Текст] / В.С. Майборода, Т.М. Капушак // Процеси механічної обробки в машинобудуванні: зб. наук. праць ЖДТУ. Вип. 3. – 2006. – С. 62 – 81.
17. Майборода, В.С. Формування магнітно-абразивного інструменту в кільцевих щілинах з різною формою поперечних перерізів робочих зон при магнітно-абразивній обробці кінцевих та осьових інструментів [Текст] / В.С. Майборода, В.М. Гейчук, О.А. Івановський // Вестник национального технического университета Украины "Киевский политехнический институт." Машиностроение. – Вып. 49. – 2006. – С. 153 – 164.

Отримано 05.11.2012