

**Д.Ю. Джулій, інж.  
В.С. Майборода, д.т.н., проф.  
І.В. Ткачук, студ.  
В.М. Гейчук, к.т.н., доц.**

*Національний технічний університет України «КПІ»*

## **ФОРМУВАННЯ МАГНІТНО-АБРАЗИВНОГО ІНСТРУМЕНТУ ПРИ МАГНІТНО-АБРАЗИВНОМУ ОБРОБЛЕННІ ДОВГОМІРНИХ ДЕТАЛЕЙ У КІЛЬЦЕВІЙ РОБОЧІЙ ЗОНІ**

*Досліджено умови формування магнітно-абразивного інструменту при магнітно-абразивному обробленні довгомірних деталей виготовлених з різних матеріалів в кільцевій робочій зоні з використанням відновлювального елемента. Встановлено, що для ефективного та рівномірного процесу оброблення довгомірних деталей доцільно використовувати протилежно встановлений елемент, що відновлює форму та абразивно-поліруючу здатність магнітно-абразивного інструменту, під кутом 35–45°. Для запобігання утворення в магнітно-абразивному інструменті малорухомих ущільнених зон та для реалізації активного перемішування магнітно-абразивного порошку доцільно використовувати коефіцієнт заповнення робочих зон в межах 0,7–1.*

**Вступ.** Реалізація ефективного процесу магнітно-абразивного оброблення (МАО) в великих робочих щілинах кільцевого типу неможлива без забезпечення постійного відновлення форми та абразивно-поліруючої здатності магнітно-абразивного інструменту (МАІ), який формується в процесі оброблення в робочих зонах магнітної системи установки.

**Стан проблеми та задачі дослідження.** Забезпечення виконання вказаних вимог до МАІ та безпосередньо до процесу МАО досягається різноманітними способами. Так в [1] запропоновано для відновлення форми МАІ в установках типу кільцева ванна використовувати додаткове феромагнітне тіло, в [2–7] пропонується використовувати концентратори магнітного потоку різної конфігурації, в [8, 9] використовують магнітні щілини певної форми в поперечному перетині, що дозволяють в процесі МАО активізувати процес перемішування магнітно-абразивного порошку за рахунок використання динамічних та магнітних сил, що виникають в процесі оброблення феромагнітних деталей. Однак використання вище згаданих методів дозволяє лише частково забезпечити необхідне відновлення в процесі МАО форми та необхідних властивостей МАІ.

Особливо проблематичне МАО консольно розташованих в робочих зонах деталей при їх нахиленому по відношенню до площини робочої зони базуванні [10]. До деталей подібного типу потрібно віднести кінцевий різальний інструмент, що потребує рівномірного оброблення всіх робочих поверхонь, включаючи і стружковідводячі гвинтові канавки, різного виду гвинтові поверхні, штоки, лопатки авіаційних двигунів, малогабаритні черв'ячні шестерні тощо. При обробленні подібних виробів відбувається витіснення основної маси МАІ в верхню або нижню частину робочих щілин, в залежності від направлення обертання навколо осі кільцевої ванни, коли оброблення виконується в режимах «натікання» або «стікання» [11, 12]. При цьому відбувається нерівномірне по висоті робочих зон оброблення [10, 13], що в значній мірі ускладнює розроблення технологічного процесу МАО довгомірних виробів. Важливо відмітити і той факт, що характер перерозподілу МАІ в зонах оброблення буде залежати і від коефіцієнта заповнення робочих зон магнітно-абразивним порошком, конструктивних особливостей зон оброблення та магнітних систем, наявності на неробочих частинах полюсних наконечників діамагнітних екранів і т.п. Раніше було показано, що використання еквідистантних магнітних щілин з перемінною величиною радіуса кільцевої зони по висоті робочих зон при МАО консольно установлених феромагнітних деталей, таких як, наприклад, кінцевий різальний інструмент [13], дозволяє забезпечити не тільки перемішування магнітно-абразивного порошку в зонах оброблення, а і сформувати МАІ з більш рівномірними по висоті робочої зони абразивно-поліруючими властивостями. Оброблення ж подібних пара- та діамагнітних деталей стержневого типу в умовах кільцевої ванни не дозволяє досягнути ефекту рівномірного оброблення по висоті [14] по причині відсутності або недостатньої дії відповідних додаткових сил магнітно-динамічного походження, що виникають між окремими групами частинок МАІ та деталлю. Аналіз раніше виконаних досліджень [10, 14–16] показав, що можливою причиною не забезпечення виконання відповідних умов, необхідних для відновлення форми МАІ може бути формування ущільнених зон в областях підвищеної концентрації магнітного потоку. Не досліджено вплив коефіцієнту заповнення робочих зон магнітно-абразивним порошком на абразивно-поліруючу здатність МАІ, яка формується в еквідистантних магнітних щілинах кільцевого типу з перемінною величиною радіуса кільцевої камери по висоті зон оброблення. Дослідження, виконане в [14, 16] та зв'язані з використанням відновлювальних магнітно-абразивний інструмент елементів не дають однозначної відповіді по раціональному його

використанні та базуванні, для забезпечення ефективного відновлення форми та характеристик МАІ в процесі MAO.

**Метою роботи** було дослідження впливу: поліруючої здатності МАІ, який формується в магнітній системі кільцевого типу з еквідистантними робочими щілинами з перемінною величиною по висоті радіуса кільцевої ванни при MAO парамагнітних матеріалів при різному ступені заповнення робочих зон; поліруючої здатності МАІ при MAO стрижневих зразків, виготовлених з різних матеріалів залежно від умов їх базування в магнітних щілинах; кут нахилу відновлювального елемента на поліруючу здатність МАІ при обробленні різних матеріалів.

**Експериментальне дослідження.** *Вплив коефіцієнта заповнення робочих щілин на поліруючу здатність МАІ.*

Дослідження виконувалось на прикладі зразків [16], виготовлених з слабо магнітної нержавіючої сталі X18H10T з вихідною шорсткістю робочих поверхонь  $R_a = 0,7$  мкм. Коефіцієнт заповнення робочих щілин –  $K_z$  варіювали в діапазоні від 0,5 до 1,25 з кроком 0,25. MAO виконували магнітно-абразивним порошком Полімам-Г з розміром частинок 200/160 мкм. За ЗОТС використовували Асфол. Швидкість обертання навколо осі кільцевої ванни відповідала рекомендаціям, наведеним в [3, 17] – 3 м/с. Магнітна індукція в робочих зонах не заповнених магнітно-абразивним порошком  $B = 0,23$  Тл. Кут нахилу зразків по відношенню до площини кільцевої ванни, яка паралельна площині обертання головки з установленими в ній деталями змінювалась від 35 до 65° [14]. Час оброблення – 1 хв. Процес MAO виконували в режимі «стікання» МАІ з оброблюваних поверхонь [10–12, 18].

Характер зміни  $R_a$  вздовж осі консольно установлених зразків після MAO при різних кутах базування деталей в залежності від величини коефіцієнта заповнення зон оброблення представлено на рисунку 1 в вигляді топограм поверхонь. В верхній частині кожної із топограм приведена зона між полюсного простору робочої щілини, в якій розташовується оброблювана деталь.

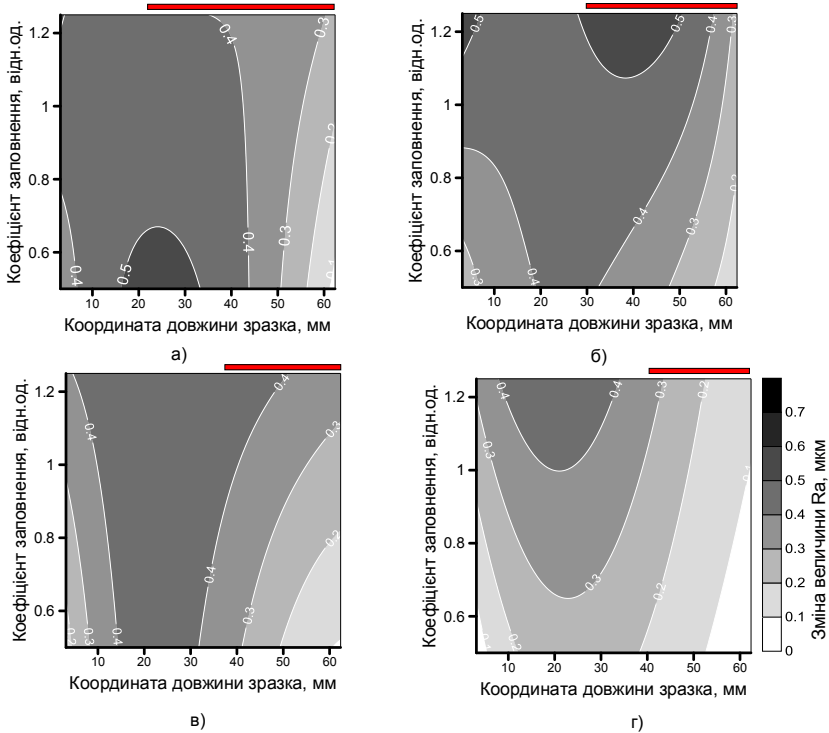


Рис. 1. Топограми поверхонь функцій зміни параметра  $R_a$  зразків після MAO в залежності від координати довжини та величини коефіцієнта заповнення робочої щілини -  $K_z$  при кутах нахилу осі зразків по відношенню до площини кільцевої ванни: а)  $35^\circ$ , б)  $45^\circ$ , в)  $55^\circ$ , г)  $65^\circ$ ; нуль відліку координати довжини зразків співпадає з краєм консолі деталі

Показано, що найбільш активне оброблення поверхні зразків реалізується не в міжполюсному просторі, а під щілиною – в області, куди витісняється основна маса МАІ в процесі MAO. Найбільш рівномірна поліруюча здатність по довжині оброблюваних зразків характерна для МАІ, який формується при MAO деталей, нахилених до площини кільцевої ванни під кутами  $35^\circ$  та  $45^\circ$ . Причому, якщо при куті  $35^\circ$  найкраща поліруюча здатність в МАІ з коефіцієнтом заповнення 0,5–0,7, то при кутах нахилу осі зразків  $45^\circ$  і більш краща поліруюча здатність – найбільша зміна параметра  $R_a$  при коефіцієнті заповнення робочих зон  $K_z > 1$ , а сам процес активного оброблення протікає не в міжполюсному просторі, а під магнітною щілиною – в

області з пониженою магнітною індукцією. Подібна різниця в особливостях процесу MAO може бути пояснена тим фактом, що в першому випадку в робочій зоні з перемінним по висоті магнітної щільності радіусом зони оброблення при малих значеннях  $K_z < 0,7$  виконується часткове відновлення форми MAI силами магнітно-динамічного походження. При  $K_z > 1$  в робочих щільностях формується малорухомий MAI з підвищеною густиною в областях концентрації магнітного потоку – зони так званого заклинювання [2] з низькою рухливістю та підвищеною поліруючою здатністю.

Аналіз залежностей зміни шорсткості поверхні вздовж осі зразків, розташованих в процесі MAO під різними кутами до площини ванни при фіксованих значеннях  $K_z$  (рис. 2), дозволив виділити найбільш раціональне значення кутів нахилу деталей, при яких забезпечується найкраща умова для полірування.

Встановлено, що найбільш рівномірне по довжині зразків полірування реалізується при величині  $K_z > 0,7$  в області кутів нахилу  $35\text{--}45^\circ$ . При використанні MAI з пониженою густиною  $K_z < 0,7$  ефективність MAO різко знижується і має місце суттєва нерівномірність оброблення по їх довжині, коли зменшення параметру Ra коливається від 0 до 0,4 мкм. При  $K_z > 0,7$  цей діапазон відповідає 0,4–0,5 мкм, причому він розподіляється відносно рівномірно вздовж осі зразків. Потрібно відмітити, що найбільш ефективне MAO буде реалізуватись при величині коефіцієнта заповнення робочих щілин –  $0,7 < K_z < 1,1$ , тобто в тих умовах, коли в MAI в процесі оброблення не виникають умови, сприяючі формуванню малорухомих зон заклинення і забезпечується відновлення форми MAI за рахунок дії сил вторинного походження, ініціюючих перемішування магнітно-абразивного порошку в зонах оброблення.

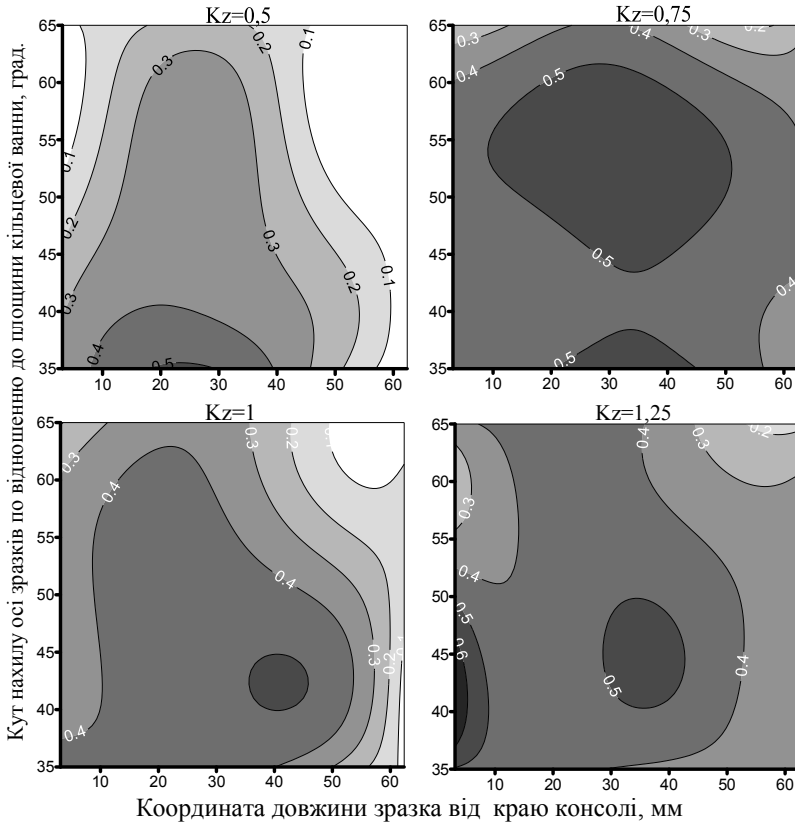


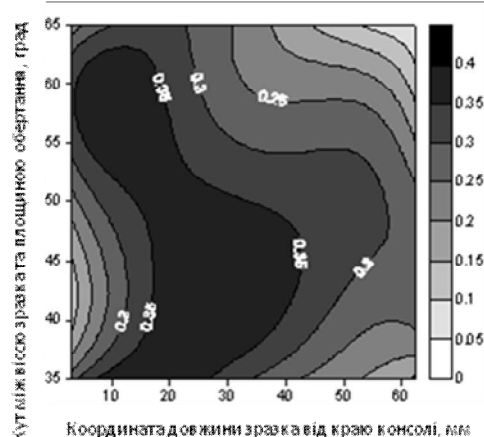
Рис. 2. Топограми поверхонь функцій зміни параметра  $Ra$  зразків після MAO в залежності від координати довжини та кута нахилу зразків по відношенню до площини кільцевої ванни при різних значеннях величини  $K_z$ ; нуль відліку координати довжини зразків співпадає з краєм консолі деталі

Дослідження поліруючої здатності MAI при MAO консольних зразків виготовлених з різних матеріалів на установці типу кільцева ванна з перемінним по висоті робочих щілин радіусом зони оброблення.

Було виконано дослідження поліруючої здатності MAI при MAO стержневих зразків при їх консольному закріпленні в експериментальній установці в умовах, аналогічних першому етапу досліджень. При цьому коефіцієнт заповнення відповідав величині, отриманій раніше і необхідній для забезпечення ефективного MAO. Обробленню піддавались зразки, виготовлені зі сплаву титану ВТ 3-1 з

вихідною шорсткістю робочих поверхонь  $Ra = 1$  мкм, зі сплаву латуні ЛС69 з вихідною шорсткістю робочих поверхонь  $Ra = 1,85$  мкм, з інструментальної загартованої сталі У9А з вихідною шорсткістю робочих поверхонь  $Ra = 0,63$  мкм та зі нержавіючої сталі Х10Н10Т з вихідною шорсткістю робочих поверхонь  $Ra = 0,54$  мкм. Після оброблення отримані результати, представлено на рисунку 3 в вигляді топограм поверхонь функцій зміни величини шорсткості поверхонь вздовж їх осі при різних кутах базування в кільцевій ванні.

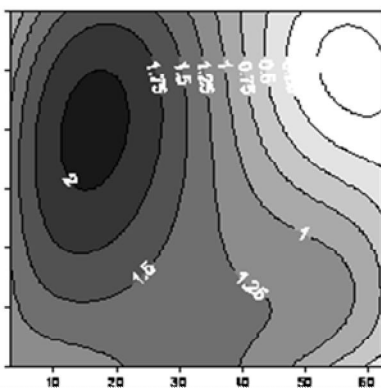
Показано, що найкраща поліруюча здатність у МАІ, сформованого із порошку Полімам-Т з розміром частинок 200/160 мкм характерна для зразків, виготовлених із діамантного сплаву – латуні і сплаву титану. При цьому для латуні найкращі результати реалізуються при кутах нахилу зразків по відношенню до площини обертання  $50-60^\circ$ , для титанового сплаву та вуглецевої сталі –  $35-45^\circ$  та для слабо магнітної нержавіючої сталі –  $45^\circ$ . В усіх випадках активне оброблення виконується в зоні з підвищеною густиною МАІ – в області, в яку витісняється основна маса МАІ в процесі МАО в режимі «стікання». Зазначимо, що підвищена поліруюча здатність МАІ при обробленні феромагнітних зразків розташована в нижній частині робочих щілин, в той час як для інших досліджуваних матеріалів – за межами робочих зон.



а)

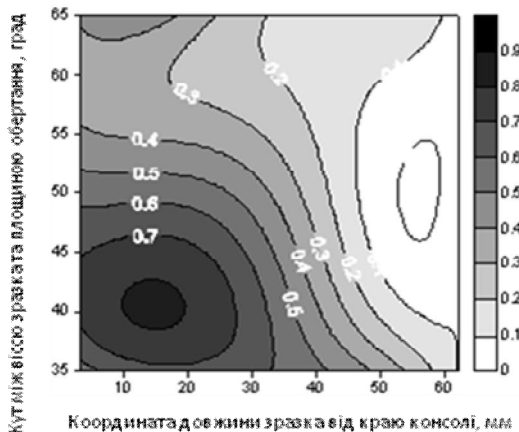


б)



Координата довжини зразка від краю консолі, мм

в)



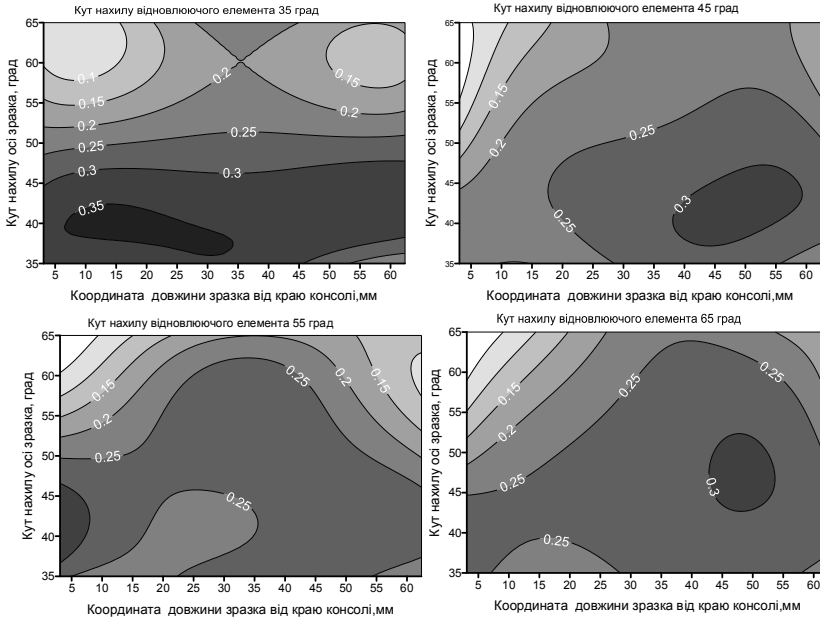
Координата довжини зразка від краю консолі, мм

г)

*Рис. 3. Топографи поверхонь функцій зміни параметра  $R_a$  зразків після MAO в залежності від координати довжини та кута нахилу осі зразків по відношенню до площини кільцевої ванни після MAO різних матеріалів: а) нержавіюча сталь, б) інструментальна вуглецева сталь, в) латунь, г) титановий сплав*

*Вплив кута нахилу відновлювального елемента на поліруючу здатність MAI при обробленні різних матеріалів.*



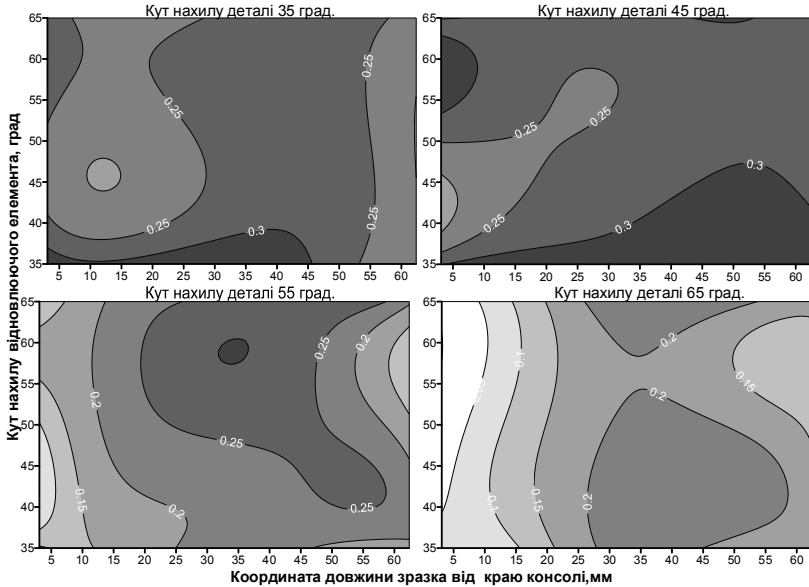


*Рис. 4. Топограми поверхонь функцій зміни параметра  $Ra$  зразків після MAO нержавіючої сталі в залежності від координати довжини та кута нахилу осі зразків по відношенню до площини кільцевої ванни при різних кутах нахилу відновлювального елемента*

Дослідження впливу кута нахилу відновлювального елемента на зміну поліруючої здатності MAI було виконано в умовах, аналогічних попереднім та на матеріалах, що використовувались на попередньому етапі досліджень. Величина кута нахилу відновлювального елемента  $\beta$ , встановленого протилежно куту нахилу деталі по відношенню до площини обертання –  $\alpha$  варіювався від 35 до 65°. Результати зміни поліруючої здатності MAI при використанні в схемі MAO відновлювального елемента при обробленні зразків із нержавіючої сталі представлені в вигляді топограм поверхонь функцій при фіксованих кутах  $\beta$  (рис. 4) та фіксованих кутах нахилу деталей до площини обертання -  $\alpha$  (рис. 5).

Аналіз отриманих результатів з урахуванням даних, приведених на рис. 3а показує, що найбільш раціональним кутом нахилу відновлювального елемента буде кут, при якому забезпечується

рівномірне по довжині зразків оброблення з максимальною величиною зменшення шорсткості поверхні. При цьому необхідно враховувати, що для забезпечення прогнозованого оброблення доцільно, щоб активна зміна параметру  $R_a$  мала місце в міжполюсному просторі робочих щілин. Вказаним вимогам відповідають умови MAO з використанням відновлювального елемента розташованого під кутом  $\beta$ , що знаходиться в діапазоні  $35\text{--}45^\circ$  при величині кута нахилу деталі до площини обертання рівній або близькій куту тертя в парі оброблювана поверхня – MAI. Для зразків із нержавіючої сталі величина кута  $\alpha$  складає  $40\text{--}45^\circ$ . Саме вказані кути установки деталі та відновлювального елемента забезпечують активне та рівномірне вздовж осі зразків оброблення з найбільшою продуктивністю. Причому найбільш активно процес MAO реалізується в міжполюсному просторі. Відбувається переміщення зони активного оброблення з області розташованої в нижній частині робочих щілин та за межами щілин в міжполюсний простір магнітних щілин – області з підвищеною магнітною індукцією. Важливо відмітити, що активно обробляється частина зразків, що знаходиться поблизу місця кріплення. Подібне управління поліруючою здатністю MAI по висоті робочих щілин дозволяє виконувати прогнозоване, позонне оброблення довгомірних консольно закріплених деталей типу кінцевий різальний інструмент, лопатки газотурбінних двигунів з висотою пера значно перевищуючою висоту робочих зон [10].

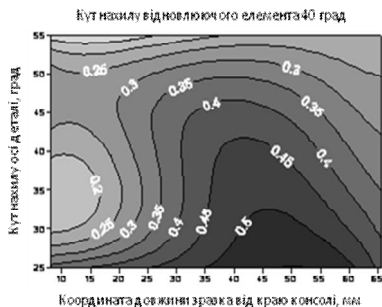


*Рис. 5. Топограми поверхонь функцій зміни параметра  $R_a$  зразків після МАО нержавіючої сталі в залежності від координати довжини та кута нахилу відновлювального елемента при різних кутах нахилу осі зразків по відношенню до площини кільцевої ванни*

При МАО зразків із сплавів титану, інструментальної сталі та латуні з застосуванням відновлювального МАІ елемента отримані аналогічні результати (рис. 6). Важливо зазначити існування розширення (в 2 і більше рази) області, в якій МАІ має підвищену поліруючу здатність. Таке розширення вказаної області особливо характерне при МАО з використанням відновлювального елемента зразків із немагнітних матеріалів. Причому інтенсивність оброблення практично не змінюється.

**Висновки.** Експериментально встановлено, що процес МАО довгомірних зразків при їх консольному закріпленні, імітуючих оброблення деталей типу кінцевий різальний інструмент доцільно виконувати при використанні протилежно встановленого відновлювального елемента під кутами  $\beta$ , рівними 35–45°. При цьому кут нахилу оброблюваних виробів в робочих щілинах повинен відповідати куту тертя в парі оброблювана деталь – магнітно-абразивний інструмент, що забезпечує найбільш рівномірне оброблення

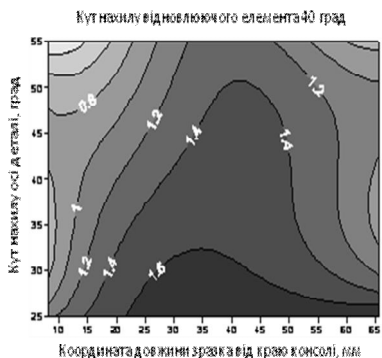
складних поверхонь. Рациональна величина коефіцієнта заповнення робочих зон магнітних щілин повинна знаходитись в діапазоні (0,7–1) – для забезпечення умов, при яких мінімізується можливість формування в МАІ малорухомих ущільнених зон та реалізується активне перемішування магнітно-абразивного порошку.



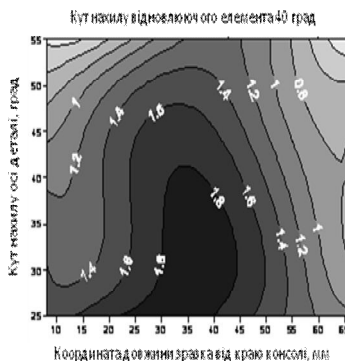
*a)*



*б)*



*в)*



*г)*

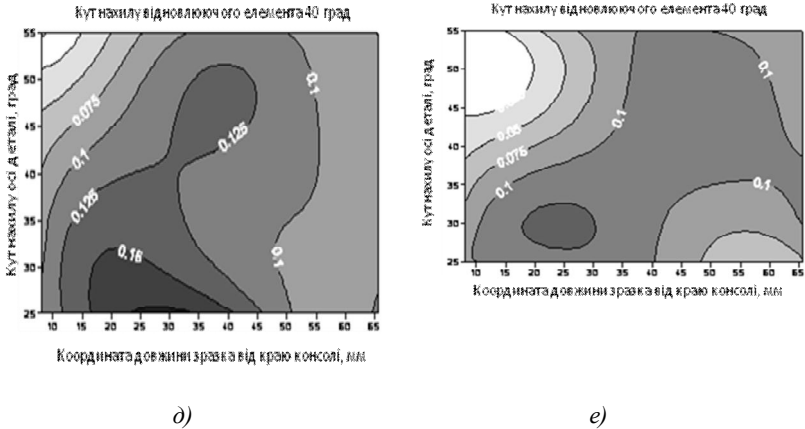


Рис. 6. Топографи поверхонь функцій зміни параметра *Ra* зразків після MAO зразків, виготовлених з різних матеріалів в залежності від координати довжини та кута нахилу осі зразків по відношенню до площини кільцевої ванни при різних кутах нахилу відновлювального елемента: а), б) – титановий сплав, в), г) – латунь, д), е) – вуглецева інструментальна сталь

## ЛІТЕРАТУРА:

1. АС СССР № 878523 В 24В 31/10 Способ магнитно-абразивной обработки / Ф.Ю. Сакулевич, Л.К. Минин, Ю.А. Базарнов и др. Заявл 04.08.75, опубл. 07.11.81, Бюл.№41.
2. Сакулевич Ф.Ю. Основы магнитно-абразивной обработки. – Мн. : Наука и техника, 1981. – 328 с.
3. Барон Ю.М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов. – Л. : Машиностроение, 1986. – 176 с.
4. Степанов О.В. Исследование процесса формирования магнитно-абразивного порошкового инструмента для обработки деталей сложной геометрической формы : дисс. ... к.т.н. – Киев, 1997. – 145 с.
5. Майборода В.С. Магнитно-абразивная обработка специальных деталей (на примере лопаток компрессоров ГТД) : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Киев, 1988. – 19 с.
6. Крымский М.Д. Формирование порошкового магнитно-абразивного инструмента. 1. Восстановимость формы // Порошковая металлургия. – 1987. – № 9. – С. 8–12.

7. *Крымский М.Д.* Формирование порошкового магнитно-абразивного инструмента. II. Условия заклинивания // Порошковая металлургия. – 1987. – № 10. – С. 23–28.
8. Патент України на винахід № 84464 С2 В24 В 31/112. Магнітна система для об'ємної обробки феромагнітними порошками / *В.С. Майборода, В.М. Гейчук*, опубл. 25.04.2009. Бюл. № 25.
9. Deutsches Patent- und Markenamt DE 10 2009 015 158 A1 2009.09.30 В24В31/112 Werkzeugenmaschine zur magnetabrasiven Bearbeitung / *V.Maiboroda, O. Byelyayev, W.Geichuk*.
10. *Майборода В.С.* Основи створення і використання порошкового магнітно-абразивного інструменту для фінішної обробки фасонних поверхонь. Дисертація ... докт.техн.наук. – Київ, 2001. – 404 с.
11. *Майборода В.С., Гейчук В.М., Клишита О.С., Беляев О.А.* Кінетика формування кромок кінцевого різального інструменту при магнітно-абразивному обробленні в магнітній системі типу «кільцева ванна» // Процеси механічної обробки в машинобудуванні. Збірник наук. праць., вип. 7, 2009. – С. 131–160.
12. *Майборода В.С.* Кінетика формування кромок кінцевого різального інструменту при магнітно-абразивному обробленні в кільцевих робочих щілинах в умовах “натікання” на робочі поверхні / *В.С. Майборода, О.А. Плівак, О.С. Клишита* // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Зб. наук. праць. – Краматорськ, вип. 24, 2009. – С. 33–37.
13. Патент України на винахід №84464 С2 В24 В 31/112. Магнітна система для об'ємної обробки феромагнітними порошками / *В.С. Майборода, В.М. Гейчук*, опубл. 25.04.2009. Бюл. № 25.
14. *Майборода В.С.* Магнитно-абразивная обработка деталей с консольным закреплением на установке типа кольцевая ванна / *В.С. Майборода, В.М. Гейчук* //Машиностроение и техносфера XXI века Сборник трудов XVII Международной научно-технической конференции 13–18.09.2010. – Севастополь. – Том 2. – 2010. – С. 130–134.
15. *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 / *В.С. Майборода, В.М. Гейчук, О.А. Івановський* // Вестник национального технического университета Украины ”Киевский

- политехнический институт”. Машиностроение. – Вып. 49. – 2006. – С. 153–164.
16. *Майборода В.С.* Особенности формирования магнитно-абразивного инструмента при магнитно-абразивной обработке длинномерных деталей в кольцевой рабочей зоне / *В.С. Майборода, Д.Ю. Джулий, І.В. Ткачук* // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. Вип. 8 (190). – Донецьк : ДонНТУ, 2011. – С. 49–56.
  17. *Олиker В.Е.* Порошки для магнитно-абразивной обработки и износостойких покрытий. – М. : Металлургия, 1990. – 176 с.
  18. *Вуельяев О.* Erhöhung der Leistungsfähigkeit von HSS-Spiralbohrern durch Einsatz der magnetabrasiven Bearbeitung. Dissertation Dr.-Ing. – Magdeburg, Germany, 2008. – 149 p.

ДЖУЛІЙ Дмитро Юрійович – інженер Національного технічного університету України «КПІ».

Наукові інтереси:

- процеси фінішного оброблення виробів із складної форми;
- різання матеріалів.

МАЙБОРОДА Віктор Станіславович – доктор технічних наук, професор Національного технічного університету України «КПІ».

Наукові інтереси:

- процеси фінішного оброблення виробів із складної форми;
- реологія порошкових середовищ у слабких магнітних полях.

ТКАЧУК Іванна Валентинівна – студентка Національного технічного університету України «КПІ».

Наукові інтереси:

- процеси фінішного оброблення виробів із складної форми;
- різання матеріалів.

ГЕЙЧУК Володимир Миколайович – доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання верстатів та машин Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут", механіко-машинобудівний інститут.

Наукові інтереси:

- розробка обладнання для магнітно-абразивної обробки;
- технологія магнітно-абразивної обробки.

Подано 24.08.2011



