

**В.С. Майборода, д.т.н., проф.**  
**К.О. Заставський, аспірант**  
**Р.Б. Жук, студент**  
*КПІ ім. Ігоря Сікорського*

## **Особливості взаємодії магнітно-абразивного інструменту з оброблюваною поверхнею в умовах кільцевої ванни**

*Досліджено особливості поведінки магнітно-абразивного інструменту (МАІ) і характер зміни сил переважно фрикційного походження, що виникають під час магнітно-абразивної обробки (МАО) циліндричних зразків діаметром 16 мм, виготовлених з феро-, пара- і діамантних матеріалів, що виникають у робочих зазорах кільцевого типу шириною 35 мм залежно від швидкості обертання навколо осі кільцевої ванни в діапазоні 100–300 об/хв, частоти обертання навколо власної осі від 0 до 80 рад/с, при магнітній індукції в зонах обробки 0,18 і 0,25 Тл, магнітно-абразивних порошкових матеріалів різного типу та розміру. Показано, що величина ефективного моменту тертя змінюється в діапазоні від 0 до 1,4 Нм. Ідентифіковано три області технологічних умов МАО: 1) область формування квазістійкого магнітно-абразивного інструменту; 2) область стабільно сформованого МАІ; 3) область з аномальним зростанням / падінням сил тертя. Аналіз отриманих закономірностей дозволив ідентифікувати процеси, пов'язані з особливостями поведінки частинок МАІ в процесі МАО при безпосередньому контакті з робочою поверхнею, а також умови утворення зон заклинювання, що виникають між полюсними наконечниками і поверхнею деталей. Показано, що використання порошків з округлою формою частинок при МАО в зазначених вище умовах обробки забезпечує переважне пластичне деформування поверхневого шару зразків з пара- і діамантних матеріалів. Найбільше на зміну сил фрикційного походження впливає зростання розміру частинок магнітно-абразивних порошків. Вплив зміни сил магнітного поля в досліджуваному діапазоні несуттєвий.*

**Ключові слова:** магнітно-абразивна обробка; сили тертя; пара-, діа- і феромагнітні матеріали; магнітно-абразивні порошки; контактна взаємодія.

**Актуальність теми.** Забезпечення ефективної фінішної обробки з використанням рухомо скоординованого магнітним полем абразивного інструменту неможливе без інформації про його властивості, розуміння умов його структурування, формування і переформування протягом технологічного циклу обробки, даних про процеси і їх особливості, що відбуваються під час контактної взаємодії з робочою поверхнею. Зазначена інформація особливо актуальна і важлива при розробці технології магнітно-абразивної обробки деталей складної просторової конфігурації на верстатах з великими зазорами кільцевого типу. Об'ємна обробка деталей подібного типу, до яких належать лопатки ГТД, непереточувані тврдосплавні різальні пластини, осьовий і кінцевий різальний інструмент, має забезпечувати не тільки формування по всіх робочих поверхнях заданої, рівномірної шорсткості, що оцінюється такими параметрами, як Ra, Rz, tp, сіткою мікронерівностей, а й формування радіусів округлення різальних кромки на інструменті, вхідних і вихідних кромки лопаток з одночасним зміцненням поверхні деталей з необхідними градієнтами зміни поверхневої твердості, залишковими напруженнями в поверхневому шарі. Важливо зазначити той факт, що вказані характеристики, як правило, формуються на заключних операціях виготовлення деталей і в умовах сучасного виробництва, передбачають використання різних технологічних методів фінішної обробки з використанням енергій електричних, магнітних, акустичних, вібраційних полів. Метод МАО, реалізований в умовах великих кільцевих робочих зазорів для фінішної обробки складнопрофільних деталей [1], дозволяє успішно вирішувати зазначені вище завдання на однотипному обладнанні, без великої кількості технологічних переходів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій, на які спираються автори.** Процес МАО в умовах великих робочих зазорів кільцевого типу деталей складної просторової форми реалізується в режимі рівномірного обтікання оброблюваних поверхонь, що забезпечується за умови формування раціонального градієнта магнітного поля в зонах обробки, виконання певних вимог як при базуванні деталей, так і виборі відповідної траєкторії їх переміщення щодо квазінерухомого магнітно-абразивного інструменту з його заданими і контрольованими, специфічними властивостями, які визначаються та забезпечуються на підставі вимог, що ставляться до якості обробки. Зазначена гама властивостей МАІ залежить не тільки від складу застосовуваних магнітно-абразивних порошків, способів їх отримання, форм і розмірів частинок, магнітних характеристик, абразивної та поліруючої здатності, а й реологічних властивостей магнітно-абразивного інструменту, що формується безпосередньо в процесі МАО. Зазначені властивості МАІ залежать від форми та геометрії його структурних складових у вигляді конусоподібних і веретеноподібних

формувань [2], «мертвих зон» поблизу полюсних наконечників [1], ущільнень, що утворюються в МАІ перед деталями [3], процесів, пов'язаних з переформуванням порошку. Саме зазначені параметри визначають ступінь ударної і фрикційної взаємодії МАІ з робочою поверхнею і безпосередньо впливають як на формування мікрорельєфу поверхонь, величини і форму різальних кромок, вхідних і вихідних кромок лопаток [2, 5–8], так і на особливості утворення зміцнених поверхневих шарів.

З урахуванням специфічних умов контактування МАІ з поверхнею деталей під час MAO [2, 4] зміцнення активно реалізується як при ударній взаємодії окремих об'ємів і структурних елементів МАІ з поверхнями деталей, аналогічно процесам, що відбуваються під час струменево-абразивної обробки [9], так і безпосередньо при триботехнічному контакті [10], в процесі тертя, скобління і мікрорізання елементів МАІ поверхні деталей. В результаті фрикційної і ударної взаємодій здебільшого в поверхневих шарах деталей відбуваються структурні зміни, змінюється напружено-деформований стан і, як наслідок, можуть відбуватися процеси, пов'язані зі зміцненням або знеміцненням матеріалу. Тому важливим аспектом під час розробки технології фінішної обробки рухливого скоординованого магнітним полем інструментом є визначення раціонального поєднання (накладення) процесів, що реалізуються при ударному і фрикційному контакті МАІ з поверхнею деталей при MAO.

Виконаний раніше теоретичний аналіз показників інтегральної енергії, що передається оброблюваній поверхні магнітно-абразивним інструментом при MAO в умовах великих робочих зазорів і залежить від сил нормального і тангенціального походження, що визначають умови ударного і фрикційного контактів, дозволив орієнтовно оцінити величину раціонального співвідношення між зазначеними силами для різних ділянок робочих поверхонь інструментів, таких як кінцевий і осьовий різальний інструмент [11–13], багатогранні непереточувані різальні пластини [1, 5], лопатки ГТД [14].

Експериментальні дослідження в зазначеному напрямі дозволили виконати тільки оцінку результату дії вказаного комплексу сил за такими непрямими показниками, як зміна шорсткості поверхні, поверхневої твердості, залишкове напруження в поверхневому шарі деталей після MAO [1, 2, 5]. Однак встановити конкретно внесок від дії сил нормального і тангенціального походження при взаємодії ділянок оброблюваних поверхонь з окремими структурними елементами МАІ не можливо через відсутність конкретної інформації про значення реальних сил. Окремі дослідження, наведені в [2, 3, 15], є недостатніми. Тому завдання з визначення (встановлення) конкретних сил фрикційного і ударного походження є, безсумнівно, актуальними і мають розглядатися, якщо можна, окремо з одночасною розробкою відповідних методик досліджень.

**Метою** роботи було визначення реальних сил, що виникають при переважній фрикційній взаємодії оброблюваних поверхонь, виготовлених з різних матеріалів магнітно-абразивними порошками, що різняться розмірами і формою частинок, магнітними властивостями залежно від умов MAO в кільцевій ванні і особливостей контактної взаємодії МАІ з поверхнею деталей.

**Викладення основного матеріалу.** Експериментальні дослідження виконували при MAO однакових циліндричних зразків, виготовлених з феромагнітної сталі 40Х13, парамагнітних сплавів алюмінію Д16Т, титану ВТ8 і діамантної мідного сплаву БрОЦ (відносна магнітна сприйнятливості сплаву  $\chi \approx -0,1 \cdot 10^{-6}$  Гн/м). Обробка виконувалася на експериментальному стенді для MAO деталей складної просторової конфігурації з кільцевою робочою зоною діаметром 200 мм, при ширині робочих зазорів 35 мм і висоті зони активної обробки 30 мм [2, 3, 5]. Стенд забезпечує обертання деталей навколо осі кільцевої ванни з регульованою частотою 50–500 об/хв, обертання деталей навколо власної осі з частотою, що змінюється в діапазоні 100–800 об/хв. При цьому забезпечується можливість контрольованого базування деталей у робочій зоні стенду як по відношенню до площини обертання в діапазоні кутів нахилу осі деталей –  $p = 0–80^\circ$ , так і в площині, дотичній до окружності кільцевої ванни –  $q = 0–60^\circ$ . Величина магнітної індукції в робочому зазорі кільцевої ванни, вільному від магнітно-абразивного порошку, може плавно регулюватися від 0 до 0,3 Тл. Стенд оснащений вимірювальним блоком, що дозволяє контролювати величини напруги і струму, споживаного двигуном постійного струму, який забезпечує обертання деталей навколо власної осі з певною частотою обертання деталей в процесі обробки. Для визначення значень сил тертя, що виникають між поверхнею деталей і МАІ у процесі обробки, використовували модифіковану методику, описану в [2, 16], яка дозволяє визначити величину моменту від сил тертя, що виникають у парі реального контакту між поверхню зразків, що обертаються, і МАІ, і певною мірою проаналізувати нюанси поведінки МАІ при MAO.

Зразки з досліджуваних матеріалів базувалися в центральній частині робочих зазорів вертикально, тобто коли вісь їхнього обертання була паралельна осі кільцевої ванни при  $p = 0^\circ$  і  $q = 0^\circ$ . Для забезпечення умов, за яких МАІ в процесі всього циклу обробки зберігає стабільні характеристики і форму, використовували відновлювальний стрижневий елемент, який розташовувався в робочій зоні під кутом, обраним за рекомендаціями, наведеними в [1, 3]. Для обробки використовували два типи магнітно-абразивних порошків, отриманих методом розпилення з розплавів – Полімам-М і Ферромап [17, 18], з розміром частинок 200/100 і 415/20 мкм. Важливо зазначити, що вибір даних порошкових матеріалів був зроблений, виходячи зі ступеня їх рівновісності і форми частинок. Так порошок Полімам-М належить до

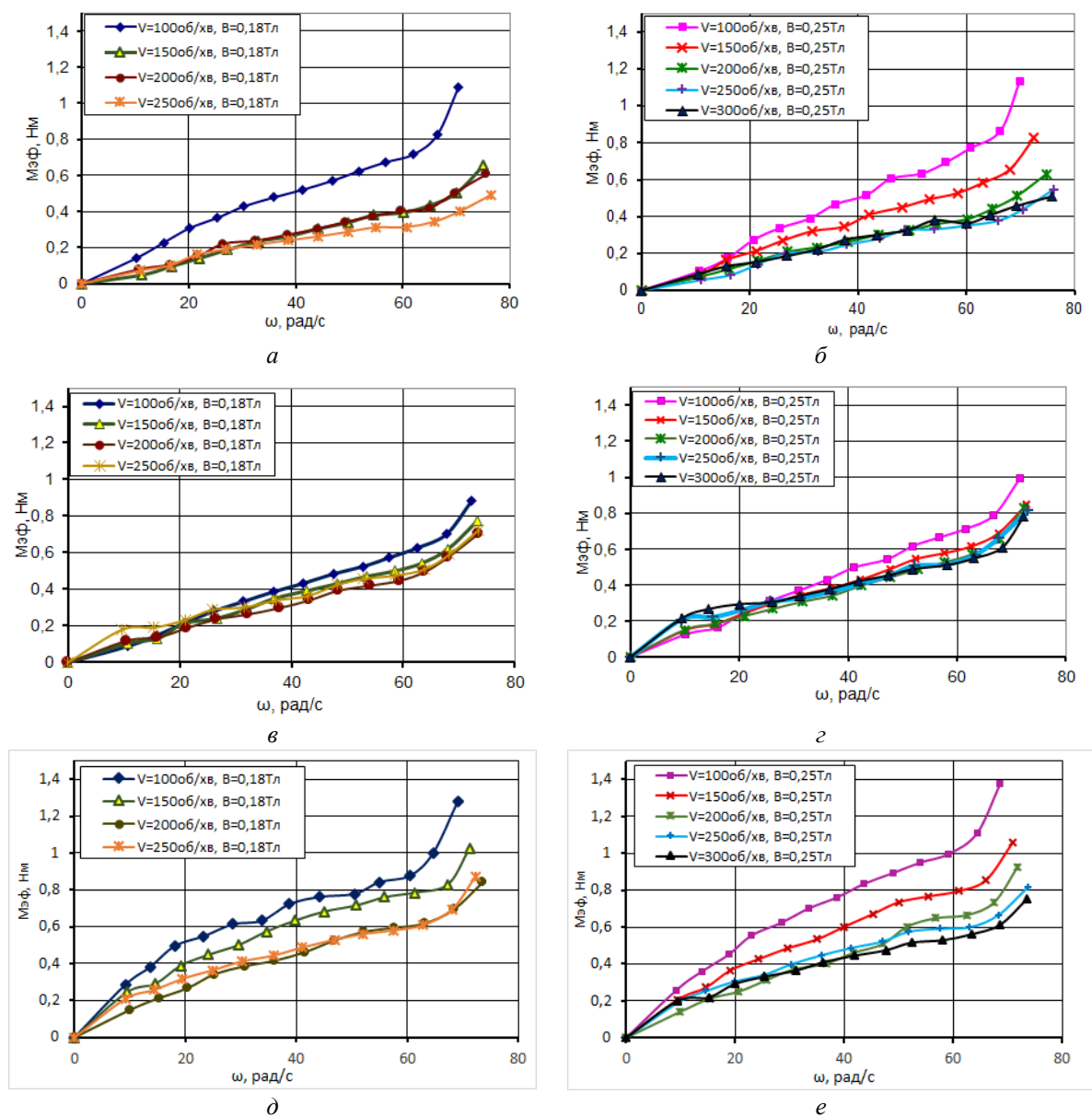
нерівновісних округлих порошоків, а Ферромап – до осколкових рівновісних. Геометричні характеристики порошоків наведені в [17]. Діаметр експериментальних циліндричних зразків становив 16 мм, а висота відповідала висоті зони активної обробки – 30 мм. Діаметр зразків був обраний таким чином, щоб з урахуванням раніше отриманих результатів [1, 2] зберігалася можливість для подальшого аналізу особливостей переформування МАІ при МАО як діа- і парамагнітних, так і ферромагнітних матеріалів.

Експериментальні дослідження виконували при двох значеннях магнітної індукції в робочих зазорах – 0,18 і 0,25 Тл. Процес тарування вимірювальної схеми виконувався перед кожною серією дослідів з метою врахування впливу як магнітного поля, так і тертя в вузлах мінішпинделя в реальних умовах процесу МАО.

Дослідження щодо впливу на зміну величини моменту від сил тертя умов обробки – швидкостей обертання навколо осі кільцевої ванни, навколо власної осі, величини магнітної індукції в робочих зазорах, типу і розмірів використовуваних магнітно-абразивних порошоків були розділені на дві групи:

- обробка ферромагнітних зразків зі сплаву 40Х13;
- обробка пара- і діамангнітних зразків зі сплавів Д16Т, ВТ 8 і БрОЦ.

На першому етапі досліджували характер зміни величини ефективного моменту тертя, що виникає при МАО сплаву 40Х13 залежно від частоти обертання навколо власної осі циліндричних зразків при різних магнітній індукції в робочих зазорах, типі і розмірі використовуваних магнітно-абразивних порошоків. Характерні залежності наведено на рисунку 1.



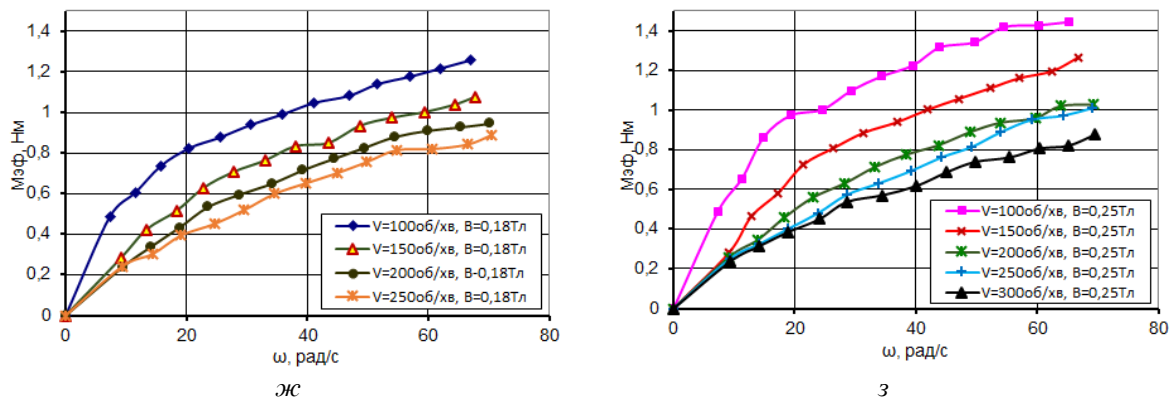


Рис. 1. Зміна величини ефективного моменту тертя при МАО сплаву 40Х13 порошками Ферромап – (а–з) і Полімам-М – (д–з) з розмірами частинок 200/100 мкм – (а, б, д, е) і 400/315 мкм – (в, з, ж, з) залежно від частоти обертання зразків навколо власної осі при різній магнітній індукції в робочих зазорах і частоті обертання навколо осі кільцевої зони

Аналіз результатів показав, що отримані залежності можна умовно розділити на три області:

- область формування в робочому зазорі квазістабільного і структурованого магнітно-абразивного інструменту, яка розташовується в діапазоні частот обертання зразків навколо власної осі – 0 – (5–10) рад/с;
- область зміни частоти обертання зразків (5–10) – (65–70) рад/с, де має місце практично лінійне зростання ефективного моменту –  $M_{\text{эф}} = \varphi_{\text{T}} \cdot \omega_0$  залежно від частоти обертання навколо власної осі –  $\omega_0$ .

Значення швидкості росту величини  $M_{\text{эф}} - \varphi_{\text{T}}$  для досліджуваних типів порошоків, величин магнітної індукції в робочих зазорах –  $B$  і частоти обертання навколо осі кільцевої ванни –  $V_0$  наведені в таблиці 1. Зі збільшенням швидкості обертання деталей навколо осі кільцевої ванни величина  $\varphi_{\text{T}}$  змінюється не значно в бік свого зменшення, що можна пояснити зміною розмірів структурних формоутворень в МАІ і характером «обтікання» магнітно-абразивним інструментом оброблюваних поверхонь [2, 3]. Збільшення магнітної індукції в робочих зазорах сприяє зростанню магнітних сил, що притягають елементи МАІ до поверхні деталі і відповідно до зростання питомих сил тертя. Особливо активно це має місце під час збільшення розміру частинок і при МАО порошком Полімам-М, який має величину намагніченості в 1,3 раза вище, ніж у порошку Ферромап [2, 8];

– область в діапазоні частот обертання зразків навколо осі кільцевої ванни – більше 65–70 рад/с, де в ряді випадків (особливо при обробці порошком Ферромап) має місце різке зростання ефективного моменту, що, мабуть, пов'язано з особливостями переформування МАІ в робочих зазорах, що проявляється в активному переміщенні частинок порошку, який в результаті дії магнітних сил і сил динамічного походження, що виникають під час обертання навколо осі кільцевої ванни і передаються групам порошку в процесі обертання деталей навколо осі кільцевої ванни, притискається до оброблюваної поверхні. Від дії сил тертя, що виникають при обертанні зразків навколо власної осі, порошок зміщується в область так званої «мертвої зони» – між полюсним наконечником і поверхнею деталі і розташовується безпосередньо на поверхні полюсних наконечників [1]. У результаті цього в зазначеній зоні формується область в МАІ з підвищеною щільністю, тобто відбувається формування стабільних, практично нерухомих ушліфлених зон, які ідентичні зонам заклинювання [19, 20], що утворюються при виході деталей із зони активної обробки при МАО циліндричних поверхонь на верстатах типу ФАС.

Показано, що при МАО ферромагнітної сталі практично на усіх залежностях  $M_{\text{эф}} = f(V_0, \omega_0)$  характерним є зменшення  $M_{\text{эф}}$  при збільшенні технологічного параметра  $V_0$ . В окремих випадках зменшення досить значне. Особливо подібне зменшення характерне для умов МАО округлим порошком Полімам-М і осколкових Ферромап з розміром частинок 200/100 мкм при швидкостях  $V_0 = 100 - 150$  об/хв. Найбільші значення величини  $M_{\text{эф}}$ , як правило, досягаються при МАО деталей зі швидкістю обертання навколо осі кільцевої ванни  $V_0 = 100$  об/хв. Це перш за все пов'язано з магнітними властивостями оброблюваного матеріалу – ферромагнітної сталі. Так при швидкості в районі  $V_0 = 100-150$  об/хв сила динамічного притискання порошкового МАІ, що діє на частину оброблюваної площі зразків, буде нижче сил магнітного походження, які забезпечують активне притягнення частинок МАІ практично до всієї оброблюваної циліндричної поверхні. Тому і зміна магнітної індукції в робочих зазорах більш-менш відчутно впливає на величину  $M_{\text{эф}}$  при низьких швидкостях обертання  $V_0 = 100-150$  об/хв.

Таблиця 1

Величини швидкості росту ефективного моменту від тертя в парі МАІ – оброблювана поверхня –  $\varphi_T$  залежно від частоти обертання зразків навколо власної осі

Тип порошку	Размір частинок, мкм	В, Тл	Частота обертання навколо осі кільцевої ванни $V_0$ , об/хв				
			100	150	200	250	300
Ферромап	200/100	0,18	0,0106	0,0071	0,0065	0,0048	
		0,25	0,0130	0,0089	0,0063	0,006	0,00585
	400/315	0,18	0,102	0,0085	0,0075	0,0066	
		0,25	0,0118	0,0092	0,0084	0,0074	0,0063
Полімам-М	200/100	0,18	0,011	0,0104	0,0089	0,0076	
		0,25	0,0145	0,0114	0,0102	0,0077	0,0069
	400/315	0,18	0,011	0,0113	0,0114	0,0111	
		0,25	0,013	0,0125	0,0127	0,0133	0,0105

На другому етапі проаналізовано характер зміни величини  $M_{\text{эф}}$  при МАО зразків, виготовлених з пара- і діамантних матеріалів. Отримані результати експериментальних досліджень після їх статистичної обробки зазначені у вигляді топограм поверхонь функціями виду  $M_{\text{эф}} = f(V_0, \omega_0)$ , отриманих при використанні зазначених вище порошкових матеріалів і магнітних індукцій у робочих зазорах. Характерні топограми поверхонь  $M_{\text{эф}} = f(V_0, \omega_0)$  для парамагнітних зразків зі сплавів алюмінію наведені на рисунку 2, титану – на рисунку 3, а діамантного сплаву міді – на рисунку 4.

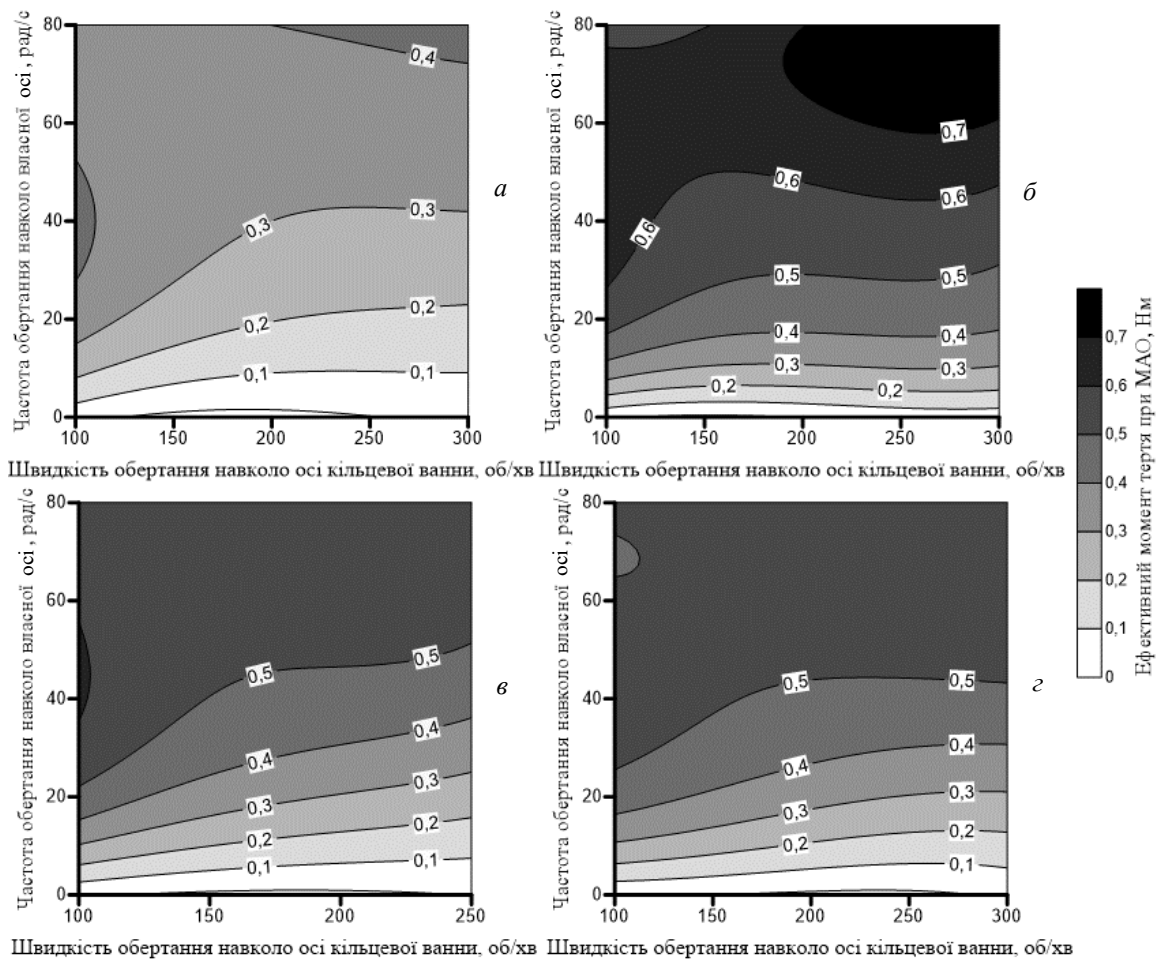


Рис. 2. Зміна величини ефективного моменту тертя при МАО сплаву Д16Т порошками Ферромап – (а, б) і Полімам-М – (в, г) з розмірами частинок 200/100 мкм – (а, в) і 400/315 мкм – (б, г) залежно від частоти обертання зразків навколо власної осі і швидкості обертання навколо осі кільцевої зони при магнітній індукції в робочих зазорах 0,18 Тл – (а, в) і 0,25 Тл – (б, г)

Аналіз отриманих результатів зміни величини  $M_{\text{эф}}$  зразків і з пара- і діаманітних сплавів показав, що порівняно з процесом MAO феромагнітної сталі 40X13 величина  $M_{\text{эф}}$  менша в 2–3 рази, що можна пояснити дією суттєво менших сил магнітного походження при взаємодії елементів МАІ з поверхнею пара- і діаманітних зразків і 50 % зменшенням площі поверхні зразків, що піддається активній обробці, де виконуються умови для забезпечення ефективного процесу MAO [1].

Зауважимо, що якщо при MAO сталевих зразків при частотах обертання навколо власної осі більше за 60–65 рад/с має місце різке зростання величини  $M_{\text{эф}}$ , то при обробці немагнітних матеріалів на першому етапі має місце активне зростання  $M_{\text{эф}}$  до частот обертання 20–25 рад/с, після чого зміна активного моменту тертя або незначна, або відсутня, а при частотах понад 60 рад/с здебільшого відбувається його зниження. Це може свідчити про те, що, починаючи з частот обертання навколо власної осі 20–25 рад/с, проявляється активне повертання окремих частинок МАІ щодо оброблюваної поверхні, що найбільш характерно для порошків з округлою формою частинок. При цьому змінюється механізм контактної взаємодії, коли сили тертя ковзання, що сприяють реалізації процесів мікрорізання і мікроскобління, переходять в тертя кочення, тобто здійснюється активне повертання частинок МАІ щодо оброблюваної поверхні, що призводить до переважної мікропластичної деформації поверхні деталей.

Слід зазначити і той факт, що при підвищених частотах обертання зразків навколо власної осі – більше за 60 рад/с явище «заклинювання» порошку в мертвій зоні активно не проявляється.

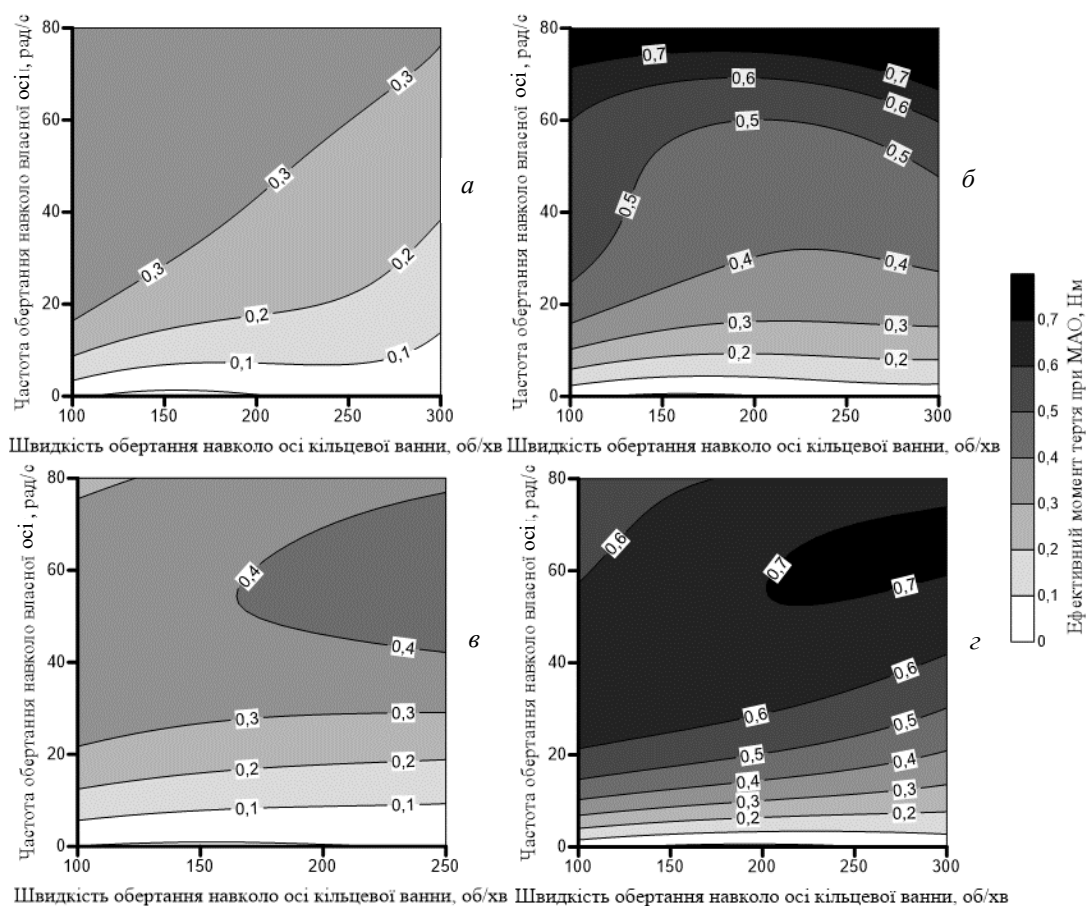


Рис. 3. Зміна величини ефективного моменту тертя при MAO сплаву VT8 порошками Ферромап – (а, б) і Полімам-М – (в, г) з розмірами частинок 200/100 мкм – (а, в) і 400/315 мкм – (б, г) залежно від частоти обертання зразків навколо власної осі і швидкості обертання навколо осі кільцевої зони при магнітній індукції в робочих зазорах 0,18 Тл – (а, в) і 0,25 Тл – (б, г)

Підтвердженням цього є зовнішній вигляд поверхні зразків з пара- і діаманітних матеріалів зі слідами мікропластичної деформації, яка реалізується в умовах активного повертання частинок щодо оброблюваної поверхні (рис. 5, а–в) і слідами мікрорізання і мікроскобління на феромагнітних деталях у режимі тертя ковзання, без активного кочення зерен МАІ щодо поверхні сталевих зразків (рис. 5, г). Зазначимо, що найбільша мікропластичної деформація характерна для зразків зі сплаву БрОЦ, який більш пластичний порівняно з Д16Т і VT8.

Для визначення ступеня впливу розміру часток МАІ і магнітної індукції в робочих зонах магнітних зазорів на зміну величини  $M_{\text{эф}}$  були побудовані топографи функцій  $\Delta M_{\text{эф}} = \zeta(V_0, \omega_0)$ , отримані в результаті віднімання функцій поверхонь  $M_{\text{эф}} = f(V_0, \omega_0)$  для різних значень магнітних індукцій і розмірів частинок порошків.

Типові топографи поверхонь функцій  $\Delta M_{\text{эф}} = \zeta(V_0, \omega_0)$ , отриманих шляхом віднімання функцій  $M_{\text{эф}} = f(V_0, \omega_0)$ , при різних значеннях магнітної індукції в робочих зазорах – 0,18 і 0,25 Тл, тобто  $\Delta M_{\text{эф}} = M_{\text{эф}}|_{0,25 \text{ Тл}} - M_{\text{эф}}|_{0,18 \text{ Тл}}$  наведені на рисунку 6 при MAO зразків виготовлених з різних матеріалів, порошками різного типу і з різною зернистістю.

Для зразків, виготовлених з парамагнітних матеріалів зі збільшенням розміру частинок від 200/100 до 400/315 мкм, зміна ефективного моменту тертя при зазначених вище магнітних індукціях у робочих зазорах не перевищує 0,35 Нм. Найбільша зміна має місце при підвищених швидкостях обертання як навколо власної осі, так і навколо осі кільцевої ванни і магнітної індукції 0,25 Тл при використанні для формування МАІ осколкових порошків Ферромап.

Показано, що магнітне поле в зазначеному вище діапазоні істотно не впливає на зміну ефективного моменту тертя в парі поверхня деталі – МАІ. Зміна ефективного моменту не перевищує 10–15 % від максимальних значень, які мають місце при MAO різних сплавів різними порошками в зазначених вище діапазонах зміни параметрів обробки. Аналіз вказаних топограм показує, що найбільша відмінність у значеннях ефективного моменту тертя при збільшенні магнітної індукції в зонах обробки від 0,18 до 0,25 Тл проявляється в основному при підвищених значеннях  $V_0$  і  $\omega_0$ , що пов'язано, як зазначалося вище, з формуванням ущільнень в МАІ в області «мертвих зон» у поверхні полюсних наконечників.

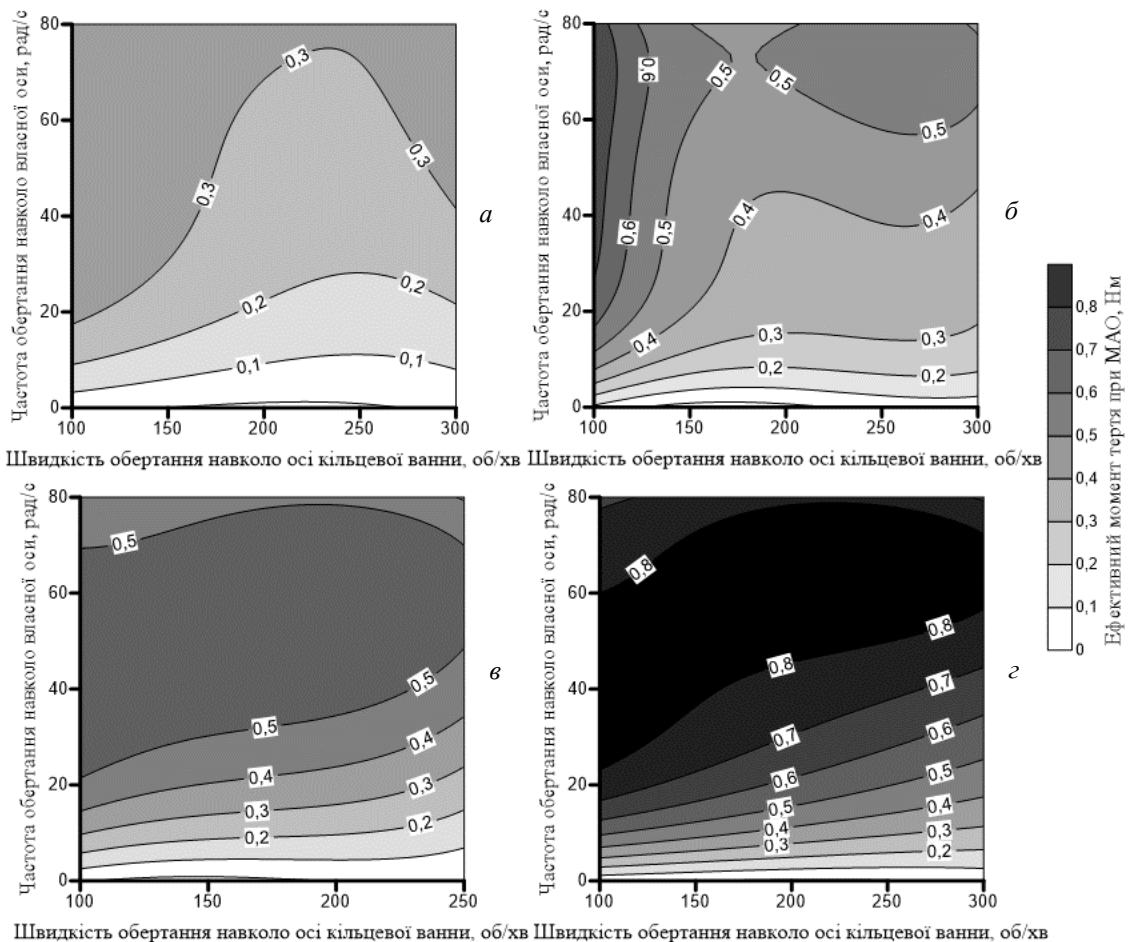


Рис. 4. Зміна величини ефективного моменту тертя при MAO діамантного сплаву БрОЦ порошками Ферромап – (а, б) і Полімам-М – (в, г) з розмірами частинок 200/100 мкм – (а, в) і 400/315 мкм – (б, г) залежно від частоти обертання зразків навколо власної осі і швидкості обертання навколо осі кільцевої зони при магнітній індукції в робочих зазорах 0,18 Тл – (а, в) і 0,25 Тл – (б, г)

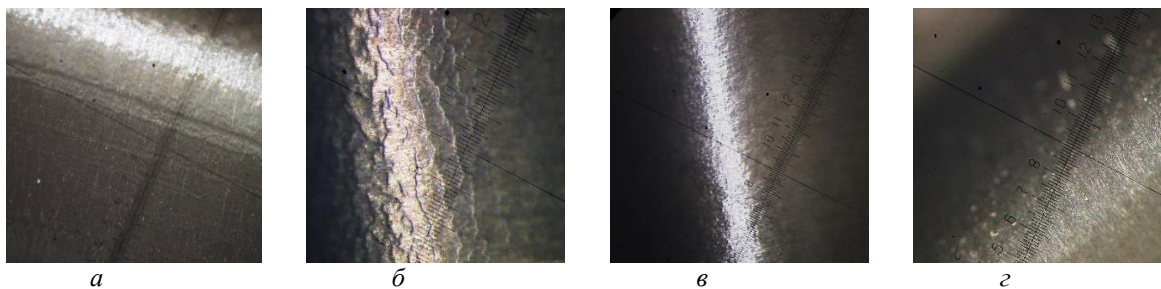


Рис. 5. Зовнішній вигляд поверхні зразків зі сплавів VT 8 – а, BrOЦ – б, Д16Т – в, 40Х13 – г після MAO

Типові топографи функцій  $\Delta M_{\text{еф}} = \zeta(V_0, \omega_0)$ , отриманих шляхом віднімання функцій  $M_{\text{еф}} = f(V_0, \omega_0)$ , що одержані в результаті MAO порошками з різним розміром частинок – 400/315 і 200/100 мкм при фіксованому значенні магнітної індукції в зонах обробки, тобто  $\Delta M_{\text{еф}} = M_{\text{еф}}|_{400/315} - M_{\text{еф}}|_{200/100}$  зазначені на рисунку 7.

При обробці округлим порошком Полімам-М найбільші значення величини  $\Delta M_{\text{еф}}$  – до 0,25–0,3 Нм проявляються при швидкостях обертання навколо осі кільцевої ванни в діапазоні 120–170 об/хв і частотах обертання навколо власної осі – 20–25 рад/с. При обробці діамантного сплаву міді зона з найбільшими значеннями  $\Delta M_{\text{еф}}$  при MAO осколковими порошками знаходиться в області швидкостей обертання  $V_0$  до 100–150 об/хв, а округлим порошком Полімам-М в області більше 200–250 об/хв. Це пов'язано з суттєвою різницею в значеннях коефіцієнтів внутрішнього тертя між шарами порошоків [2] і, відповідно, особливостями переформування і руху частинок порошку в локальних мікрооб'ємах МАІ в безпосередній близькості від оброблюваної поверхні діамантних деталей, пов'язаних з дією пондеромоторних сил, що сприяють змінам у локальних мікрооб'ємах сил магнітного походження.

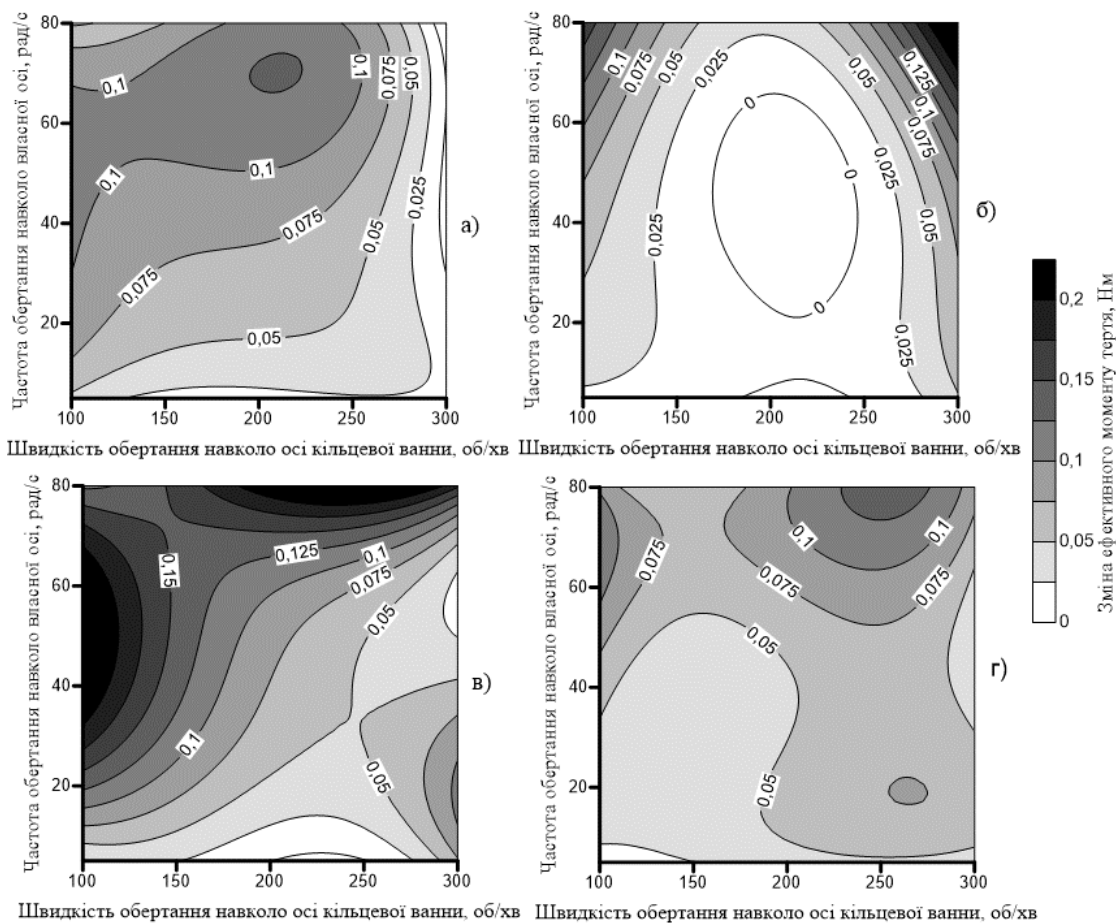


Рис. 6. Зміна ефективного моменту тертя, що визначається збільшенням магнітної індукції в робочих зонах від 0,18 до 0,25 Тл при обробці зразків, виготовлених зі сплаву титану VT8 – (а, б) і сталі – (в, г) при MAO порошком Ферромап з розміром частинок 400/315 мкм – (б, г), Полімам-М з розміром частинок 200/100 мкм – (а) і 400/315 мкм – (в)



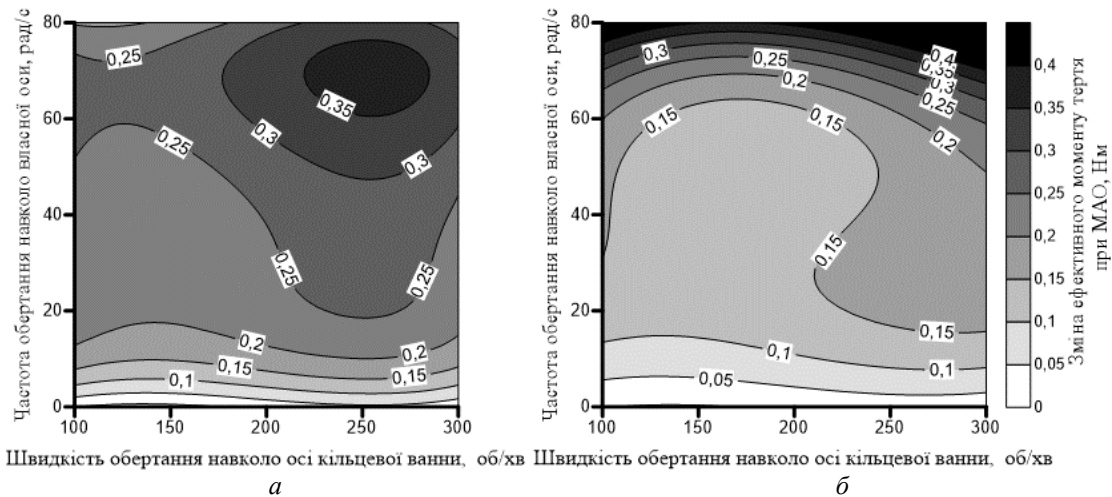


Рис. 7. Зміна ефективного моменту тертя, що визначається збільшенням розміру часток порошку Ферромап від 200/100 до 400/315 мкм при обробці зразків, виготовлених зі сплаву алюмінію – (а) і сплаву титану – (б) при МАО з магнітною індукцією в робочих зазорах 0,25 Тл

Аналогічна, але протилежна дія пондеромоторних сил проявляється при МАО сталевих зразків, коли збільшення розміру частинок МАІ, сформованого з порошку Полімам-М, призводить до зростання питомих сил тертя на величину більше за 0,3–0,4 Нм при частотах обертання навколо власної осі деталей 50–65 рад/с (рис. 8).

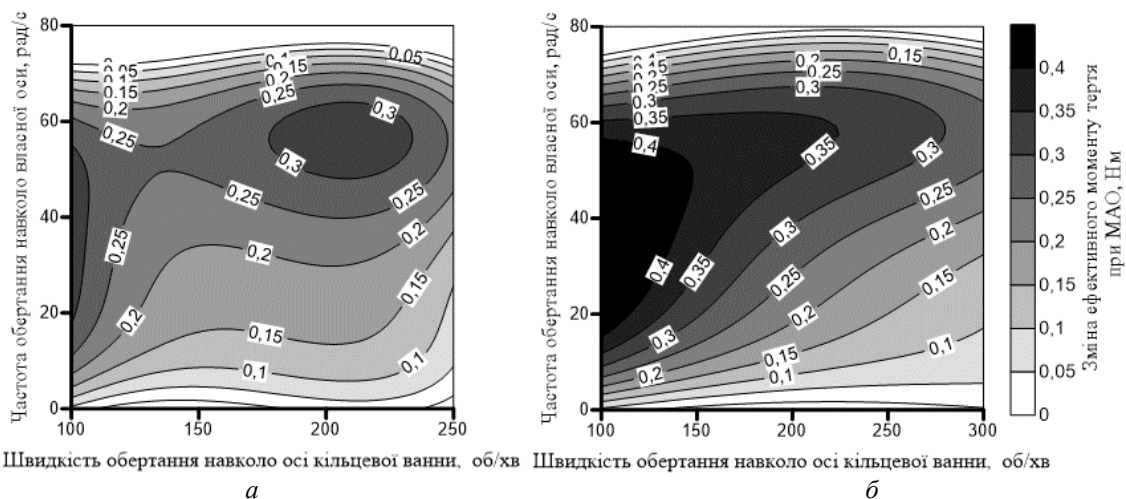


Рис. 8. Зміна ефективного моменту тертя, яке пов'язане зі збільшенням розміру частинок порошку Полімам-М від 200/100 до 400/315 мкм при обробці зразків, виготовлених зі сталі 40Х13, при МАО з магнітною індукцією в робочих зазорах 0,18Тл – (а) і 0,25 Тл – (б)

**Висновки.** Досліджено особливості поведінки магнітно-абразивного інструменту і характер зміни сил переважно фрикційного походження, що виникають при магнітно-абразивній обробці циліндричних зразків діаметром 16 мм, виготовлених з феро, пара- і діамантних матеріалів, що виникають у робочих зазорах кільцевого типу шириною 35 мм залежно від швидкості обертання навколо осі кільцевої ванни в діапазоні 100–300 об/хв, частоти обертання навколо власної осі від 0 до 80 рад/с, при магнітній індукції в зонах обробки 0,18 і 0,25 Тл, типу і розмірів магнітно-абразивних порошкових матеріалів. Показано, що величина ефективного моменту тертя змінюється в діапазоні від 0 до 1,4 Нм. Встановлено області технологічних умов МАО, за яких відбувається формування квазістійкого магнітно-абразивного інструменту, область стабільно сформованого МАІ, і область з аномальним зростанням / падінням сил тертя. Аналіз отриманих закономірностей дозволив ідентифікувати процеси, пов'язані з особливостями поведінки частинок МАІ в процесі МАО при безпосередньому контакті з робочою поверхнею, а також умови утворення зон заклинювання, що виникають між полюсними наконечниками і поверхнею деталей. Показано, що використання порошків з округлою формою частинок при МАО в зазначених вище умовах обробки забезпечує переважне пластичне деформування поверхневого шару зразків з пара- і діамантних матеріалів. Найбільше на зміну сил фрикційного походження впливає зростання розміру часток магнітно-абразивних порошків. Вплив зміни сил магнітного поля в досліджуваному діапазоні несуттєвий.

## Список використаної літератури:

1. *Майборода В.С.* Магнитно-абразивная обработка деталей сложной формы / *В.С. Майборода, И.В. Слободянюк, Д.Ю. Джулий.* – Житомир : ПП «Рута», 2017. – 272 с.
2. *Майборода В.С.* Основи створення і використання порошкового магнітно-абразивного інструменту для фінішної обробки фасонних поверхонь : дис. ... докт. техн. наук / *В.С. Майборода.* – Київ, 2001. – 404 с.
3. *Ткачук І.В.* Формування магнітно-абразивного інструменту зі стабільними властивостями в робочих зазорах кільцевого типу : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / *І.В. Ткачук.* – Київ, 2015. – 164 с.
4. *Акулович Л.М.* Магнитно-абразивная обработка сложнопрофильных поверхностей деталей сельскохозяйственных машин / *Л.М. Акулович, Л.Е. Сергеев.* – Минск : БГАТУ, 2019. – 272 с.
5. *Джулий Д.Ю.* Підвищення якості багатограних непереточуваних твёрдосплавних пластин при магнітно-абразивному обробленні в кільцевій ванні : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / *Д.Ю. Джулий.* – Київ, 2014. – 175 с.
6. *Byelyayev O.* Erhöhung der Leistungsfähigkeit von HSS-Spiralbohrern durch Einsatz der magnetabrasiven Bearbeitung : PhD. Thesis / *O.Byelyayev ; Otto von Guericke.* – Magdeburg, Germany, 2008. – 150 p.
7. *Финишная обработка поверхностей при производстве деталей / С.А. Клименко, М.Ю. Копейкина, В.И. Лавриненко и др. ; под общ. ред. С.А. Чижик, М.Л. Хейфец.* – Минск : Беларуская навука, 2017. – 376 с.
8. *Степанов О.В.* Исследование процесса формирования магнитно-абразивного порошкового инструмента для обработки деталей сложной геометрической формы : дисс. ... канд. техн. наук : 05.16.06 / *О.В. Степанов.* – Киев, 1997. – 145 с.
9. *Проволоцкий А.Е.* Струйно-абразивная обработка деталей машин / *А.Е. Проволоцкий.* – Киев : Техника, 1989. – 177 с.
10. *Крагельский И.В.* Основы расчетов на трение и износ / *И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов.* – М. : Машиностроение, 1977. – 526 с.
11. Магнітно-абразивна обробка осевого і кінцевого різального інструменту / *В.С. Майборода, Д.В. Хроновский, В.І. Солодкий, Н.В. Ульяненко* // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2002. – № 5. – С. 69–73.
12. Features of magneto-abrasive machining of taps / *V.MaiBORODA, D.Tarhan, D.Dzhulii, I.Slobodianiuk* // Acta Mechanica et Automatica. – Bialystok University of Technology, Poland. – 2020. –Vol. 51. – 7 p.
13. *Тарган Д.В.* Аналіз інтенсивності магнітно-абразивного оброблення мітчиків в залежності від кінематичних параметрів процесу / *Д.В. Тарган, В.С. Майборода, Д.Ю. Джулий* // Сучасні технології в машинобудуванні, транспорті та гірництві : Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського.– Кременчук : КрНУ, 2017. – № 106. – С. 82–88.
14. *Гейчук В.М.* Синтез кінематики процесу магнітно-абразивної обробки в кільцевій ванні : автореф дис. ... докт. техн. наук : 05.03.01/ *В.М. Гейчук.* – К., 2012. – 40 с.
15. *Івановський О.А.* Формування магнітно-абразивного інструменту для оброблення свердел в умовах великих магнітних щілин : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / *О.А. Івановський.* – Київ, 2009. – 135 с.
16. *Майборода В.С.* Магнитно-абразивная обработка специальных деталей : дисс. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / *В.С. Майборода.* – К., 1988. – 170 с.
17. *Ткачук І.В.* Геометричні характеристики магнітно-абразивних порошків / *І.В. Ткачук, В.С. Майборода* // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. – 2014. – № 34. – С. 49–55.
18. *Олиker В.Е.* Порошки для магнітно-абразивної обробки і зносостійких покриттів / *В.Е. Олиker.* – Москва : Металлургия, 1990. – 176 с.
19. *Барон Ю.М.* Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов / *Ю.М. Барон.* – Ленинград : Машиностроение, 1986. – 176 с.
20. *Сакулевич Ф.Ю.* Основы магнитно-абразивной обработки / *Ф.Ю. Сакулевич.* – Мн. : Наука и техника, 1981. – 328 с.

## References:

1. *Maiboroda, V.S., Slobodyanyuk, I.V. and Dzhulii, D.Yu.* (2017), *Magnitno-abrazivnaya obrabotka detalei slozhnoi formy*, PP «Ruta», Zhitomir, 272 p.
2. *Majboroda, V.S.* (2001), «Osnovy stvorennja i vykorystannja poroshkovogo magnitno-abrazivnogo instrumentu dlja finisnoi' obrobky fasonnih poverhon'», D.Sc. Thesis of dissertation, Kyi'v, 404 p.
3. *Tkachuk, I.V.* (2015), «Formuvannja magnitno-abrazivnogo instrumentu zi stabil'nymy vlastyvostjamy v robochih zazorah kil'cevogo typu», Ph.D. Thesis of dissertation, 05.03.01, Kyi'v, 164 p.
4. *Akulovich, L.M. and Sergeev, L.E.* (2019), *Magnitno-abrazivnaya obrabotka slozhnoprofil'nykh poverkhnostei detalei sel'skokhozyaistvennykh mashin*, BGATU, Minsk, 272 p.
5. *Dzhulij, D.Ju.* (2014), «Pidvyshhennja jakosti bagatogrannyh neperetochuvanyh tverdospлавnyh plastyn pry magnitno-abrazivnomu obroblenni v kil'cevij vannii», Ph.D. Thesis of dissertation, 05.03.01, Kyi'v, 175 p.
6. *Byelyayev, O.* (2008), «Erhöhung der Leistungsfähigkeit von HSS-Spiralbohrern durch Einsatz der magnetabrasiven Bearbeitung», Ph.D. Thesis of dissertation, Otto von Guericke, Magdeburg, Germany, 150 p.
7. *Klimenko, S.A., Kopeikina, M.Yu., Lavrinenko, V.I. i dr.* (2017), *Finisnaya obrabotka poverkhnostei pri proizvodstve detalei*, in Chizhik, S.A. and Kheifets, M.L. (ed.), *Belaruskaya navuka*, Minsk, 376 p.
8. *Stepanov, O.V.* (1997), «Issledovanie protsessa formirovaniya magnitno-abrazivnogo poroshkovogo instrumenta dlya obrabotki detalei slozhnoi geometricheskoi formy», Ph.D. Thesis of dissertation, 05.16.06, Kiev, 145 p.
9. *Provolotskii, A.E.* (1989), *Struino-abrazivnaya obrabotka detalei mashin*, Tekhnika, Kiev, 177 p.

10. Kragel'skii, I.V., Dobychin, M.N. and Kombalov, V.S. (1977), *Osnovy raschetov na trenie i iznos*, Mashinostroenie, M., 526 p.
11. Majboroda, V.S., Hronovskiy, D.V., Solodkyj, V.I. and Ul'janenko, N.V. (2002), «Magnitno-abrazyvna obrobka os'ovogo i kincevogo rizal'nogo instrumentu», *Naukovi visti NTUU «KPI»*, 2002, No. 5, pp. 69–73.
12. Maiboroda, V., Tarhan, D., Dzhulii, D. and Slobodianiuk, I. (2020), «Features of magneto-abrasive machining of taps», *Acta Mechanica et Automatica*, Bialystok University of Technology, Poland, Vol. 51, 7 p.
13. Targan, D.V., Majboroda, V.S. and Dzhulij, D.Ju. (2017), «Analiz intenzynosti magnitno-abrazyvnogo obroblennja mitchkyiv v zalezhnosti vid kinematychnyh parametriv procesu», *Suchasni tehnologii' v mashynobuduvanni, transporti ta girnyctvi*, Visnyk KrNU imeni Myhajla Ostrograds'kogo, KrNU, Kremenchuk, No. 106, pp. 82–88.
14. Gejchuk, V.M. (2012), «Syntez kinematyky procesu magnitno-abrazyvnoi' obrobky v kil'cevij vannii», Abstract of D.Sc. dissertation, 05.03.01, K., 40 p.
15. Ivanov'skyj, O.A. (2009), «Formuvannja magnitno-abrazyvnogo instrumentu dlja obroblennja sverdel v umovah velykyh magnitnyh shhilyn», Ph.D. Thesis of dissertation, 05.03.01, Kyi'v, 135 p.
16. Maiboroda, V.S. (1988), «Magnitno-abrazivnaya obrabotka spetsial'nykh detalei», Ph.D. Thesis of dissertation, 05.02.08, K., 170 p.
17. Tkachuk, I.V. and Majboroda, V.S. (2014), «Geometrychni harakterystyky magnitno-abrazyvnyh poroshkiv», *Nadijnist' instrumentu ta optymizacija tehnologichnyh system*, No. 34, pp. 49–55.
18. Olikier, V.E. (1990), *Poroshki dlya magnitno-abrazivnoi obrabotki i iznosostoikikh pokrytii*, Metallurgiya, Moskva, 176 p.
19. Baron, Yu.M. (1986), *Magnitno-abrazivnaya i magnitnaya obrabotka izdelii i rezhushchikh instrumentov*, Mashinostroenie, Leningrad, 176 p.
20. Sakulevich, F.Yu. (1981), *Osnovy magnitno-abrazivnoi obrabotki*, Nauka i tekhnika, Mn., 328 p.

**Майборода** Віктор Станіславович – доктор технічних наук, професор Київського політехнічного інституту імені Ігоря Сікорського.

Наукові інтереси:

- фізика процесів різання;
- фінішна обробка;
- реологія порошкових середовищ у магнітному полі.

**Заставський** Костянтин Олегович – аспірант Київського політехнічного інституту імені Ігоря Сікорського.

Наукові інтереси:

- магнітно-абразивна обробка;
- реологія порошкових середовищ у магнітному полі;
- технологія машинобудування.

**Жук** Роман Борисович – магістр Київського політехнічного інституту імені Ігоря Сікорського.

Наукові інтереси:

- технологія машинобудування;
- магнітно-абразивна обробка;
- поведінка порошку в робочих зазорах.

Стаття надійшла до редакції 22.09.2021.