

УДК 621.923

Майборода В.С.

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут". Україна, Київ

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАГНІТНО-АБРАЗИВНОГО ІНСТРУМЕНТУ, СФОРМОВАНОГО З ДВОХ ФРАКЦІЙНИХ СУМІШЕЙ ПОРОШКІВ ПРИ МАГНІТНО-АБРАЗИВНІЙ ОБРОБЦІ У ВЕЛИКИХ МАГНІТНИХ ЩІЛИНАХ

### Анотація

Визначено особливості переструктурування МАІ в умовах великих магнітних щілин, запропоновано уточнену фізичну модель поведінки порошкового середовища в процесі магнітно-абразивної обробки. Досліджено властивості МАІ, який сформовано з двох фракційних сумішей порошків магнітно-абразивних матеріалів з різними технологічними характеристиками. Визначено умови при яких відбувається псевдозрідження МАІ шляхом реалізації "ефекту підшипника" або підвищення його жорсткості шляхом реалізації "ефекту армування".

### Abstract

The features of rearrangement of a magnetic-abrasive tool (MAT) in requirements of large operating slots are defined, it is offered a updated physical analog of behavior of powder medium during magnetic-abrasive handling. The properties MAT are explored which is formed from two fractional mixtures of powder magnetic-abrasive with different processing behavior. The requirements are defined, at which there is a fluidization MAI at the expense of embodying "of effect of the bearing" or heightening of its rigidity at the expense of embodying "of effect of a sheathing".

### Вступ

Ефективність процесу магнітно-абразивної обробки (МАО) в значній мірі визначається складом і умовами формування в процесі обробки магнітно-абразивного інструменту (МАІ). Традиційно при МАО використовується в якості робочого тіла для формування МАІ відносно вузько фракційні порошкові магнітно-абразивні матеріали (ММ). Їх застосування в умовах малих робочих щілин, при незначних кількостях магнітно-абразивного порошку в робочих зонах і магнітних індукціях в межах 0,8–1,2 Тл себе виправдовує при МАО деталей відносно простої форми [1, 2]. При МАО складнопрофільних виробів, до яких відносяться деталі типу лопатки турбін і компресорів, кінцевий різальний інструмент, багатогранні непереточуванні різальні пластини в багатьох випадках потребує застосування схем обробки, в яких забезпечується відтворення

складної траєкторії переміщення зазначених виробів в зонах обробки, для реалізації якої необхідним стає використання магнітних щілин значної величини [2, 3]. Для таких схем обробки найважливішим технологічним фактором процесу МАО, який забезпечує ефективний процес обробки стає швидкість відносного переміщення порошкового МАІ відносно поверхонь, що оброблюються. Крім того використання великих магнітних щілин передбачає використання в процесі МАО значної кількості МАІ, який активно переміщується під час обробки, "обтікає" оброблювану поверхню. Для забезпечення рівномірного оброблення деталей складної просторової конфігурації необхідно відтворення таких умов, при яких відносна швидкість переміщення частинок і окремих макрооб'єктів МАІ по кожній ділянці деталі була близька до оптимальної, необхідної для відтворення заданого знімання матеріалу, мікро пластичного деформування поверхні і поверхневого шару, тощо. Вирішення такої задачі виконується в двох напрямках:

- за рахунок ускладнення траєкторії руху деталей в робочих щілинах з врахуванням умов їх формоутворення, експлуатації при підвищених швидкостях обробки;

- шляхом керування реологічними властивостями МАІ, які дозволяють уникнути утворення в процесі МАО так званих "тіньових зон" – ділянок деталей, в яких обробка неактивна, або повністю відсутня в наслідок недостатньої рухливості МАІ.

### Стан проблеми

Дослідження реологічних властивостей МАІ при МАО в умовах великих магнітних щілин [3] дозволили встановити не тільки вплив різноманітних технологічних факторів на сили питомого тертя в МАІ, а і запропонувати континуальне, модельне уявлення особливостей формування МАІ в умовах великих магнітних щілин при їх кільцевому розташуванні. Проте виконанні дослідження стосувалися переважно вузько фракційних складів порошків ММ, що використовували для формування МАІ. Окремі дослідження по використанню в умовах МАО з великими магнітними щілинами сумішей порошків дозволили визначити перспективність цього напрямку, проте існуючі дані явно не достатні.

При чому усі відомі результати було отримано при швидкостях МАО до 2–2,5 м/с при дослідженні МАІ з сумішей без систематичного підходу до їх формування. Зважаючи на зазначене метою даної роботи було вивчення особливостей формування порошкового МАМ, його переформування і руху окремих об'ємів МАІ з сумішей, складених з двох вузько фракційних порошоків з крупними і дрібними частинками в умовах великих магнітних щільностей і підвищених швидкостях обробки.

### Експериментальні дослідження

За методикою, наведеною в [3, 4] визначали вплив магнітної індукції в робочих щільностях в діапазоні 0,2–0,41 Тл, швидкості МАО в діапазоні 1–10 м/с на сили питомого тертя в парі оброблювана поверхня – МАІ з сумішей, сформований з порошкових МАМ з розміром частинок 630/400 мкм і 160/100 мкм і різним відсотковим складом. Дослідження виконували для наступних сумішей порошкових МАМ: Феромап (630/400 мкм) – Феромап (160/100 мкм); Феромап (630/400 мкм) – ПР Р6М5 (160/100 мкм), Феромап (630/400 мкм) – Полимм-М (160/100 мкм); Феромап (630/400 мкм) – Царамам (160/100 мкм); Полимам-М (630/400 мкм) – Царамам (160/100 мкм) і Царамам (630/400 мкм) – Феромап (160/100 мкм). Вибраний зазначений діапазон фракцій обумовлений рекомендаціями, наведеними в [3]. Окремі технологічні властивості застосовуваних порошкових МАМ і МАІ монофракційного складу, необхідні для подальшого аналізу результатів досліджень, наведено в табл. 1.

При напруженості магнітного поля в робочих щільностях 600–650 кА/м відносна магнітна проникливість  $\mu_{\text{відн}}$  для зазначених порошкових МАМ в складі МАІ знижується від 1,63 до 1,2 в ряду Полимам-М → Феромап → Царамам → ПР Р6М5. Дослідження технологічних властивостей сумішей показали, що максимальну щільність мають суміші, складені з рівновісних порошкових МАМ з вмістом дрібної фракції в суміші в межах 14%. Намагніченість сумішей з рівновісних МАМ максимальна у випадку вмісту дрібної фракції в суміші в межах 40–45%. У випадку формування сумішей з рівновісних і нерівновісних частинок

МАМ намагніченість змінюється монотонно і може бути визначена за правилом адитивності.

*Суміш Феромап (630/400 мкм) – Феромап (160/100 мкм).*

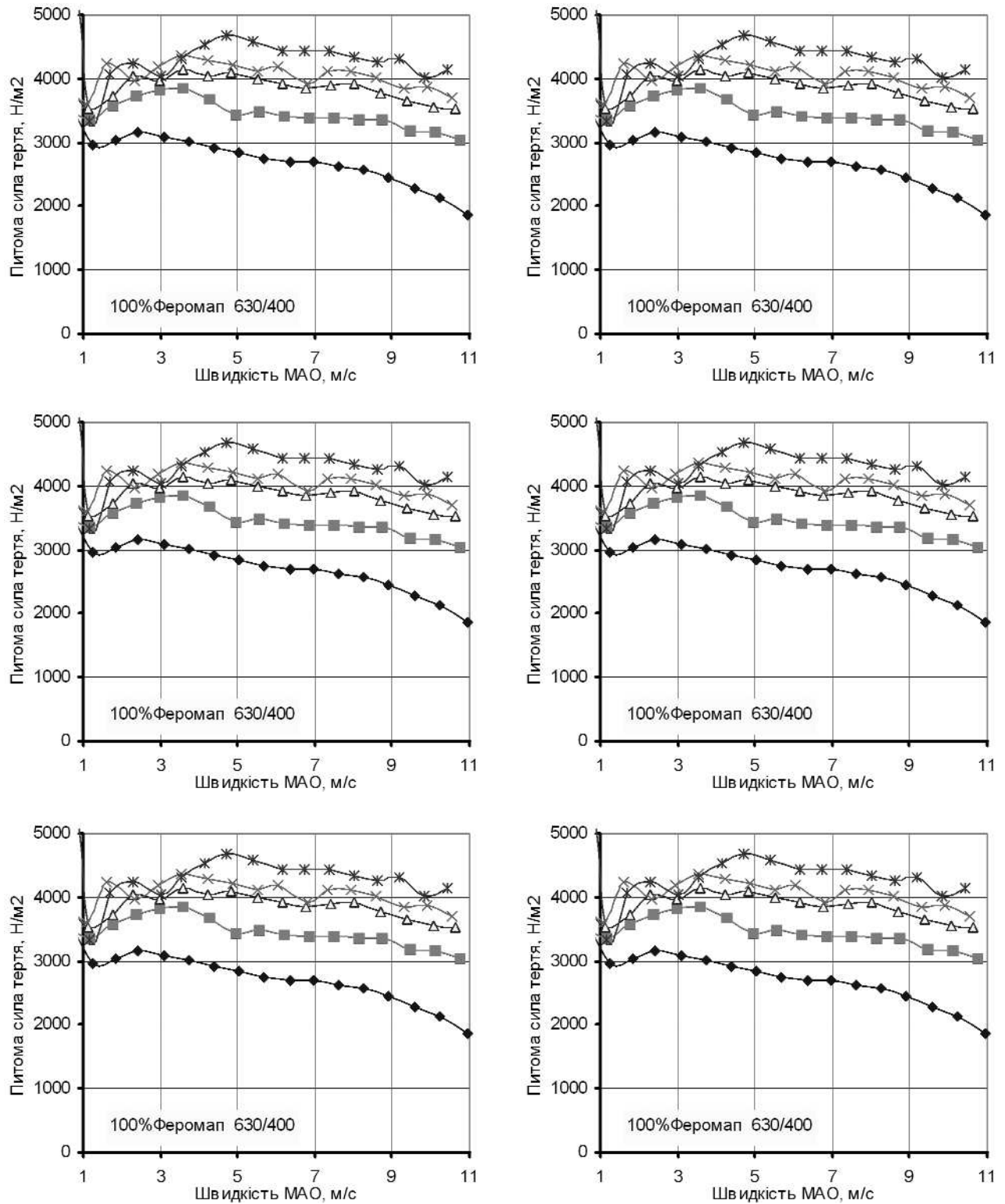
Експериментальні результати зміни питомих сил тертя в залежності від швидкості МАО при різних значеннях магнітної індукції в робочих щільностях для різних складів сумішей наведено на рис. 1.

Отриманні данні і попередні експериментальні дослідження монофракційного МАІ показали, що питома сила тертя в діапазоні магнітних індукцій 0,1–0,41 Тл при збільшенні швидкості МАО від 0,5 до 1,8 м/с змінюється несуттєво як для дрібних (160/100 мкм), так і для крупних (630/400 мкм) фракцій МАМ. В межах підвищених швидкостей МАО – до 10–11 м/с для крупної фракції характерним є зростання сил тертя з підвищенням магнітної індукції за квадратичною залежністю, якою описуються Максвеловські напруження, що виникають в МАІ в результаті дії магнітних сил. Важливо відзначити, що різниця у величині сил тертя на початку і в кінці досліджуваного швидкісного діапазону тим більша, чим менша магнітна індукція в зонах обробки. Так при  $B=0,15–0,2$  Тл ця різниця досягає 60%, а при  $B=0,4–0,41$  Тл – не перевищує 10%. Зазначимо, що в області низьких магнітних індукцій тенденція у зміні величини питомих сил тертя – монотонне зниження, а при  $B=0,3–0,41$  Тл сили тертя практично незмінні, з неявно вираженим максимумом у діапазоні швидкостей 3–5 м/с. Для монофракційного МАІ з дрібного МАМ Феромап при магнітних індукціях 0,2–0,3 Тл закономірності в зміні питомих сил тертя аналогічні, в той час як при індукціях в робочих щільностях 0,37–0,41 Тл має місце явно виражений максимум, характерний для швидкостей 1,9–3 м/с.

Для аналізу поведінки МАІ з сумішей складених з вище вказаних МАМ доцільним є представлення отриманих результатів у вигляді трьохмірних поверхонь або їх топограм – залежностей питомої сили тертя від швидкості МАО і магнітної індукції в робочих щільностях для сумішей різного складу і залежностей зміни питомої сили

Таблиця 1

Тип МАМ	Розмір частинок МАМ, мкм	Форма частинок МАМ	Коефіцієнт нерівності, $K_f$	Коефіцієнт внутрішнього тертя	Відносна площа фактичного контакту МАІ з оброблюваною поверхнею $S_f$
Царамам	630/400	округла	1,88	0,58	0,038
Феромап		оскольч.	1,54	0,96	0,053
Полимам-М		округла	1,61	0,49	0,058
Феромап	160/100	оскольч.	1,59	0,7	0,057
Полимам-М		округла	1,43	–	0,04
ПР Р6М5		округла	1,03	0,43	0,071
Царамам		округла	2,8	–	0,052



**Рис. 1.** Залежність питомих сил тертя при МАО від швидкості обробки при різних значеннях магнітної індукції в робочих щілинах для сумішей різного складу з порошкових ММ Феромап 630/400 мкм) і Феромап (160/100 мкм)

тертя від швидкості МАО і відсоткового складу сумішей при фіксованих значеннях магнітної індукції в робочих щілинах. Експериментальні залежності наведено на рис. 2 і на рис. 3 відповідно.

Аналіз отриманих результатів показує, що для МАІ з монофракційного крупного порошку величина питомих сил тертя  $-f$  у діапазоні магнітних індукцій 0,2–0,3 Тл слабо залежить від швидкості обробки.

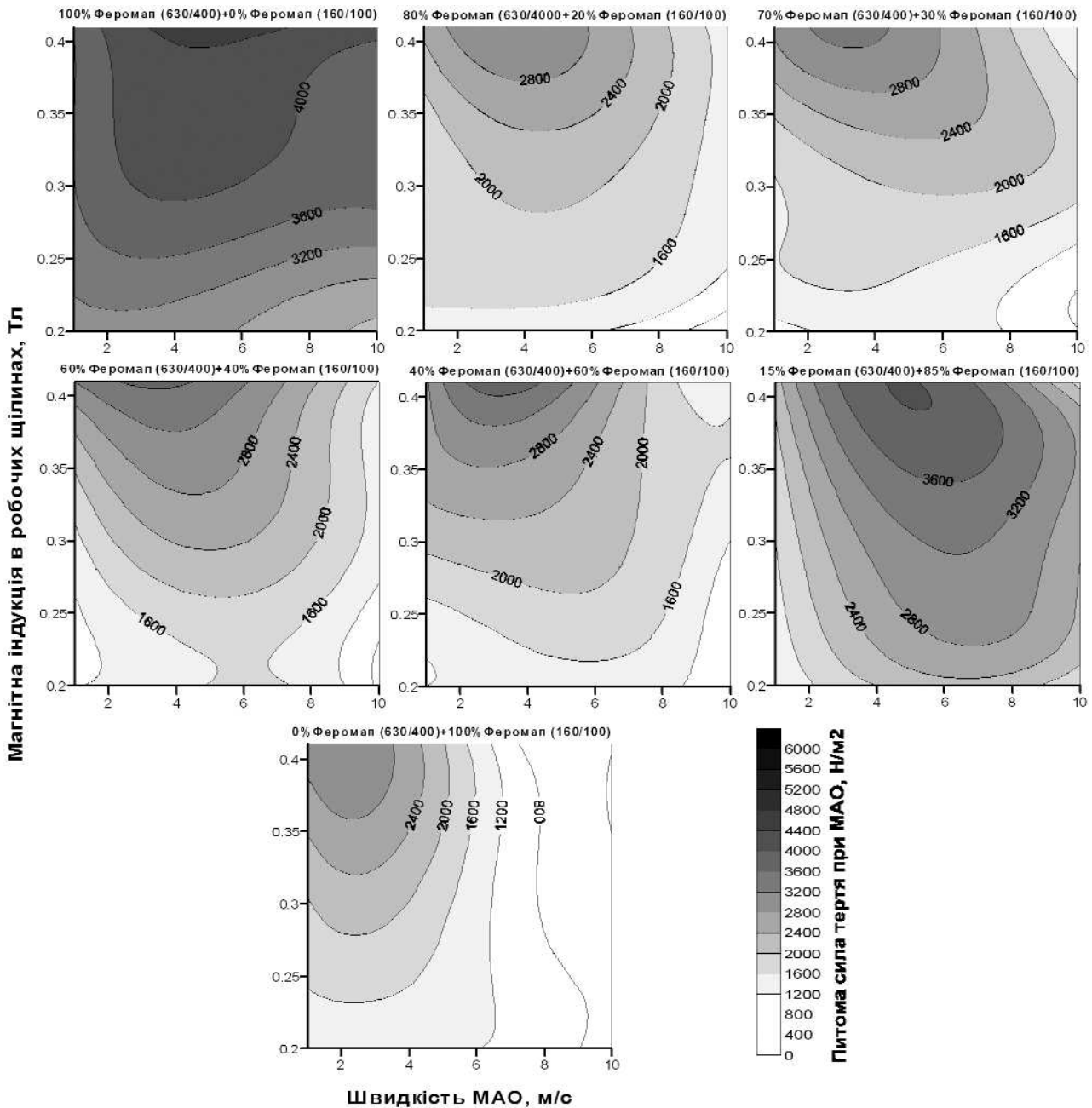
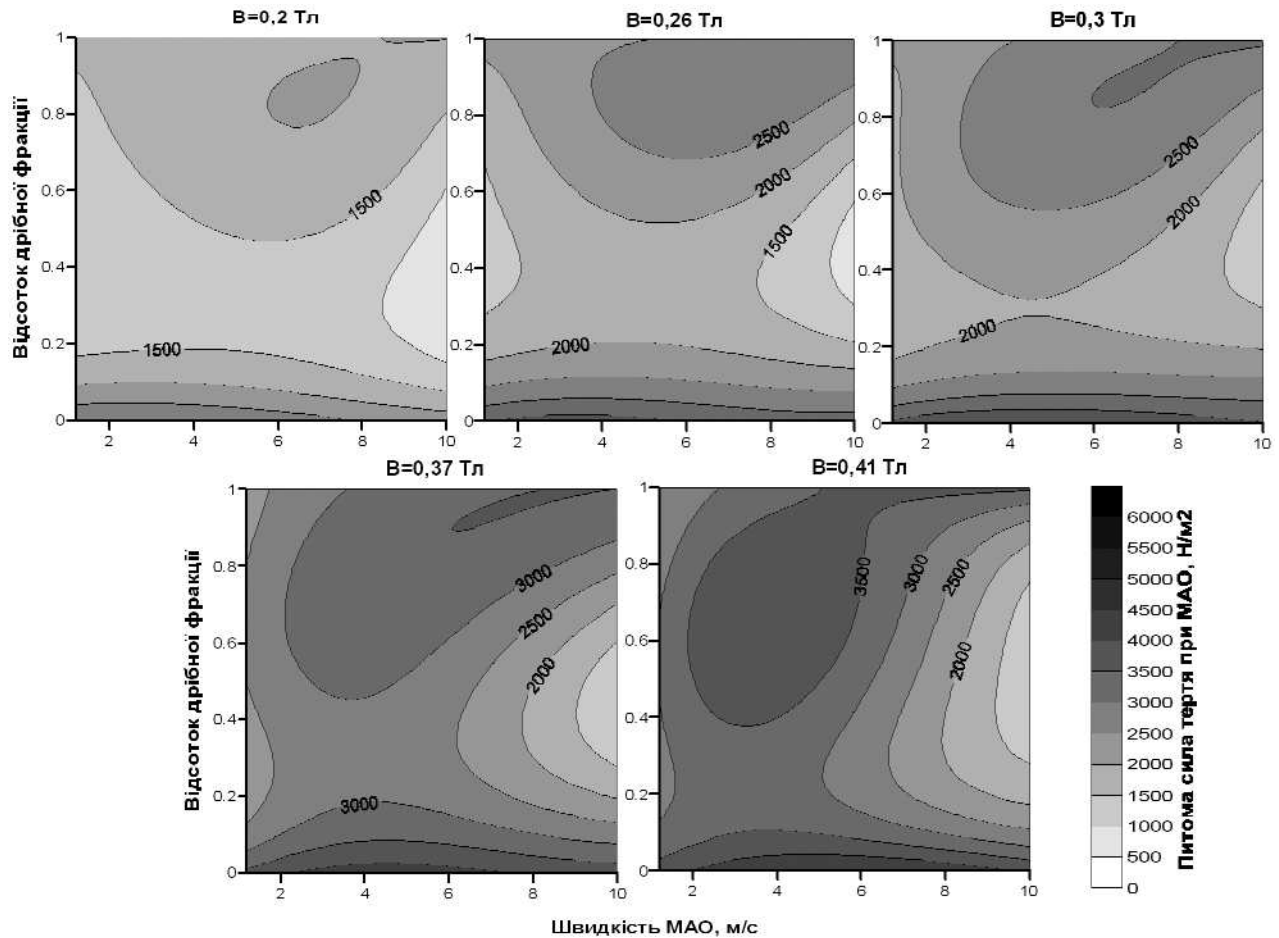


Рис. 2. Зміна питомих сил тертя в МАІ в залежності від магнітної індукції в робочих щілинах і швидкості МАО для різних складів сумішей типу Феромап (630/400 мкм) і Феромап (160/100 мкм)

При індукції В-0,3-0,41 Тл виявляється максимум, притаманний швидкостям МАО 3,8–4,2 м/с. Це свідчить про те, що магнітне поле сприяє структуруванню МАІ вздовж силових ліній магнітного поля. При цьому формуються з окремих частинок МАМ щільні, відносно стабільні конусоподібні стовпчики і веретеноподібні формування [3]. Для МАІ з монофракційного дрібного порошку з характерним розміром частинок 160/100 мкм швидкість МАО —  $V$  не є визначальною, особливо в умовах при  $V > 4$  м/с. Максимум величини  $f$  при цьому зміщується в напрямку менших швидкостей

— 2–2,5 м/с. Це пояснюється перш за все меншою масою окремих представницьких об'ємів, які формуються в МАІ при МАО: для крупної фракції маса більша, в наслідок чого більшою є інерційність порошкового середовища. Крім того внутрішнє тертя у МАІ з крупних порошоків на 30% вище, чим у МАІ, який сформовано з порошкового МАМ з розміром частинок 160/100 мкм. Необхідно враховувати при цьому магнітні властивості МАІ і його щільність, які опосередковано впливають на інерційність порошкового середовища і здатність його до переформування. Фактично



**Рис. 3.** Зміна питомих сил тертя в МАІ в залежності від швидкості МАО і відсоткового складу сумішей типу Феромап 630/400 мкм) і Феромап (160/100 мкм) при фіксованих значеннях магнітної індукції в робочих щілинах

в зазначених межах швидкостей ( $>4$  м/с) у МАІ з дрібного порошку проявляється ефект "псевдо зрідження", пов'язаний з дією пондеромоторних сил, які сприяють зниженню в'язкості, підвищенню текучості і сприяють стабілізації тиску порошку на оброблювану поверхню.

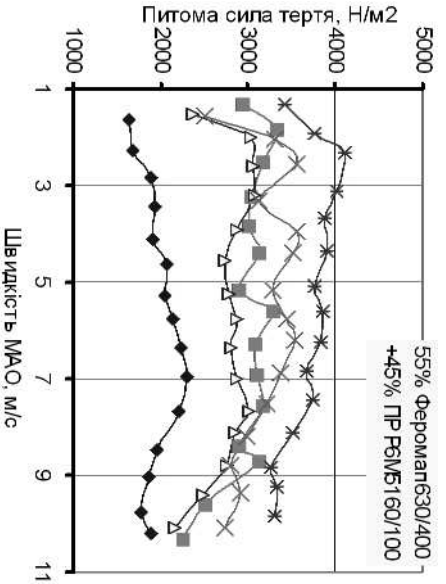
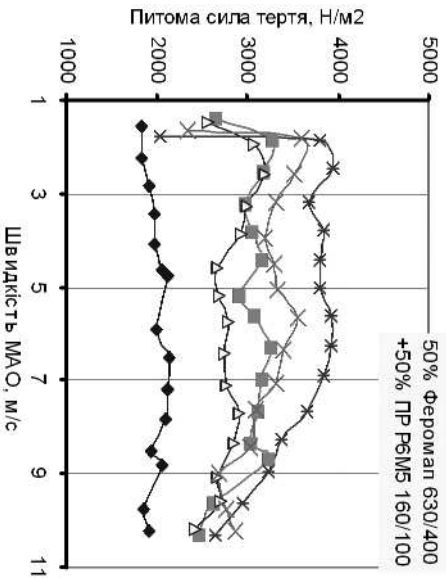
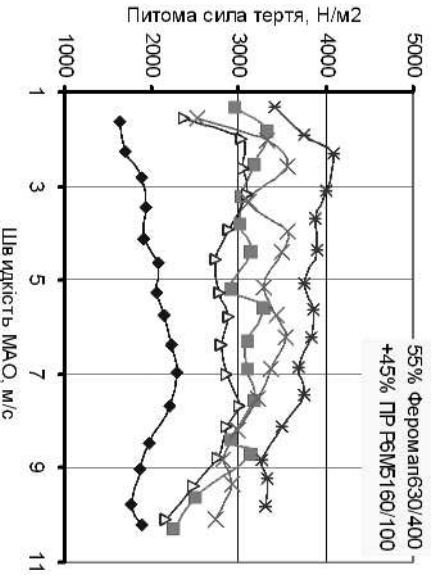
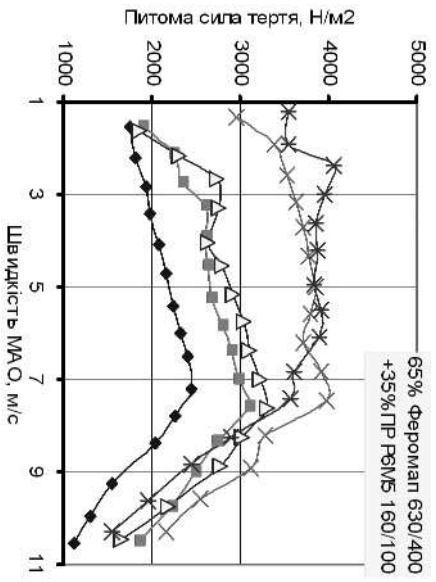
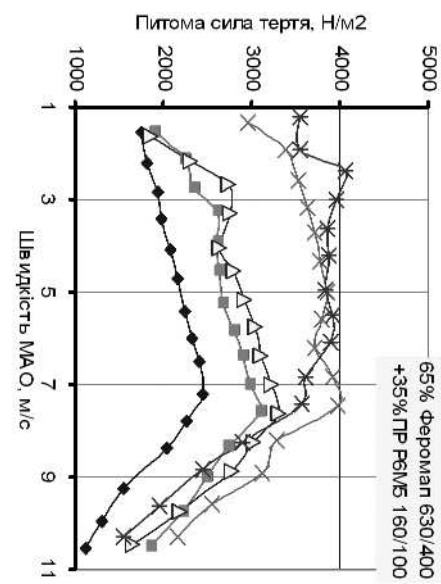
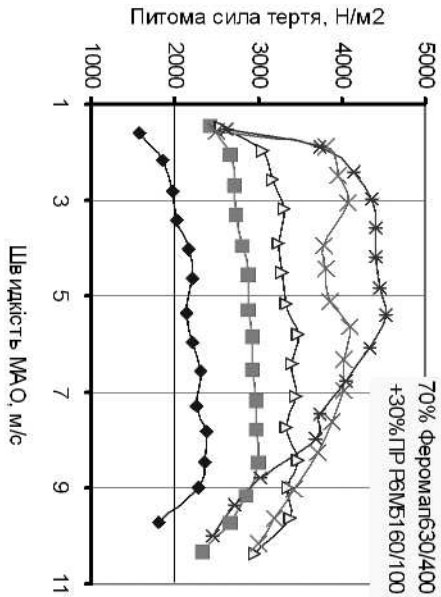
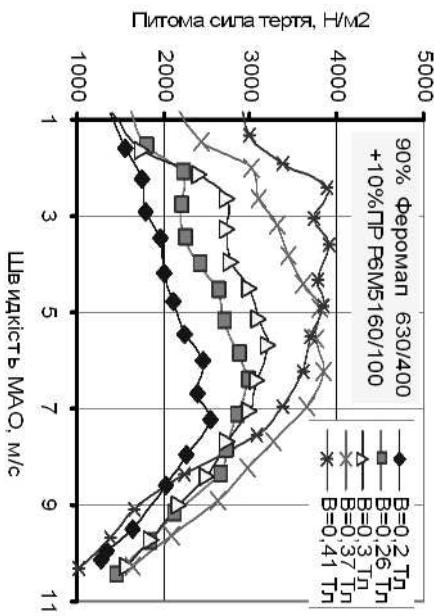
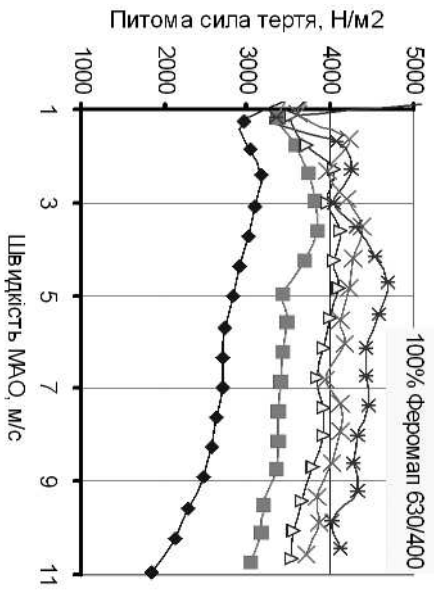
Застосування МАІ, сформованого з сумішей зазначених вище порошкових МАМ дозволило виявити окремі ефекти, пов'язані з особливостями структурування МАІ. Показано, що введення до складу крупного порошкового МАМ 20–30% дрібної фракції призводить до різкого зниження питомих сил тертя при МАО. Причому найбільш активне зниження величини  $f$  відбувається при магнітній індукції –  $B$  порядку 0,3 Тл в усьому досліджуваному діапазоні швидкостей МАО. Протилежний ефект виявляється при введенні до дрібного порошку 10–15% крупної фракції, в особливості при швидкостях МАО 5–8 м/с і підвищеній магнітній індукції – більше 0,37 Тл. Якщо в першому випадку особливості поведінки МАІ при обробці пов'язані з "ефектом підшипника" [3], то у другому випадку – ефектом "армування". Для інших досліджуваних сумішей

залежність зміни питомих сил тертя МАІ оброблювану поверхню досить монотонна без екстремумів.

*Суміш Феромап (630/400 мкм) – ПР Р6М5 (160/100 мкм).*

Результати досліджень зміни питомих сил тертя для монофракційного МАІ з порошку ПР Р6М5 (160/100 мкм) показали, що для нього характерним є більш високий питомий тиск і питоме тертя, чим у МАІ з порошку Феромап (160/100 мкм) і навіть з порошку Феромап (630/400 мкм) (рис. 4, 5), що пояснюється більшою величиною – на 22% площі фактичного контакту МАІ –  $S_f$  з оброблюваними поверхнями.

Для МАІ, який сформовано з дрібного порошку ПР Р6М5 швидкість МАО слабо впливає на питомі сили тертя, в особливості при магнітних індукціях у робочих щілинах до 0,25–0,3 Тл, у порівнянні з МАІ з порошку Феромап того ж розміру. Це пояснюється меншою величиною внутрішнього тертя в МАІ і більшою рухливістю інструменту з порошкового МАМ ПР Р6М5, чим з Феромап. Додавання до крупної фракції Феромап (630/400 мкм) дрібного ПР Р6М5, як і у



◆ V=0,2 Тл  
 ■ V=0,26 Тл  
 ▲ V=0,3 Тл  
 △ V=0,37 Тл  
 \* V=0,41 Тл

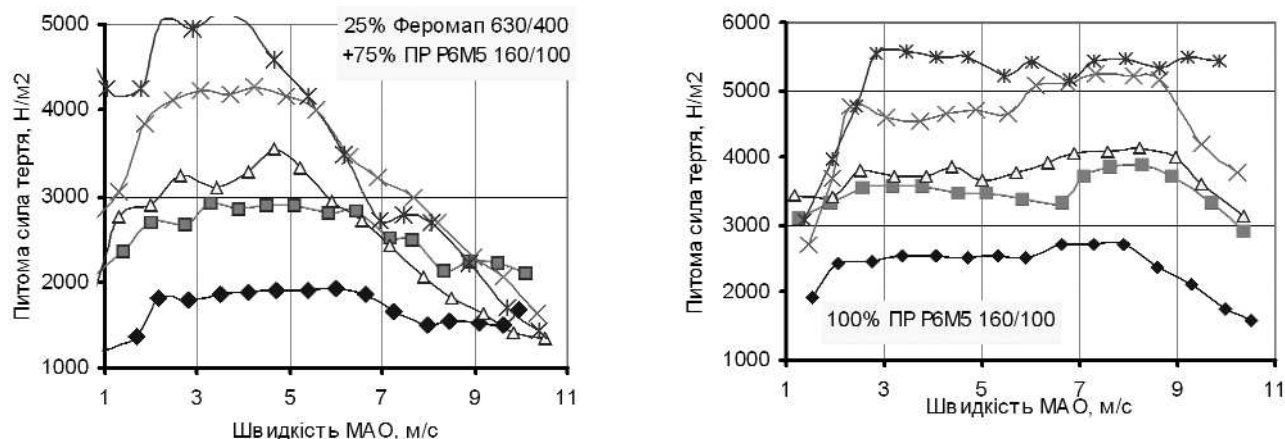


Рис. 4. Залежність питомих сил тертя при MAO від швидкості обробки при різних значеннях магнітної індукції в робочих щілинах для сумішей різного складу з порошкових МАМ Феромап 630/400 мкм) і ПР Р6М5 (160/100 мкм)

випадку сумішей Феромап (630/400 мкм) – Феромап (160/100 мкм), вже при малої кількості дрібної фракції призводить до різкого зниження питомих сил тертя при MAO. Хоча, якщо використовувати правило адитивності повинно виявлятися зростання питомих сил. При цьому важливо врахувати і той факт, що незначна кількість дрібного порошку з розміром частинок 160/100 мкм в крупному 630/400 мкм – 14% – сприяє формуванню суміші з найбільшою щільністю. Зниження питомих сил тертя у такому випадку пояснюється переважно "ефектом підшипника" [3], при якому дрібні частинки з меншою величиною намагніченості (при ідентичній напруженості магнітного поля) обволакують частинки з більшою намагніченістю – більш крупні і виконують роль кулькових "прошарків" між ними. Важливо відзначити, що явище "армування" відсутнє. При малих кількостях фракції 160/100 мкм найбільш активне зниження величини  $f$  виявляється в діапазоні швидкостей  $V < 4$  м/с при індукції 0,25–0,37 Тл.

При умові, що кількість дрібної фракції в суміші менша 50% активне зменшення величини  $f$  виявляється в усьому діапазоні швидкостей MAO при магнітних індукціях в робочих щілинах 0,3–0,35 Тл. Відзначимо, що при підвищених значеннях величини  $V$  для аналогічних складів сумішей має місце зростання питомих сил тертя при низькій магнітній індукції. Така поведінка сумішей порошкових МАМ, з яких формується МАІ пов'язана як з ефектами псевдозрідження, так і особливостями перегрупування крупних і дрібних частинок, яке полягає в тому, що більш крупні частинки з більшою намагніченістю зміщуються в області з підвищеною магнітною індукцією в робочих зонах – безпосередньо біля полюсних наконечників. При цьому за умов з зниженим значенням внутрішнього тертя в МАІ дрібні, майже сферичні частинки з складу суміші

виштовхуються в центральну частину робочих щілин – область біля оброблюваної поверхні. Підтвердженням факту перерозподілення в робочих щілинах частинок суміші по розмірам в процесі MAO є топограми залежностей питомої сили тертя від швидкості MAO і відсоткового складу сумішей (рис. 6), де показано, що при  $B \geq 0,26$  Тл для МАІ з сумішей, в яких вміст дрібної фракції знаходиться в районі 50% виявляється максимум при швидкостях до 8–9 м/с. Зазначена зона з підвищеними значеннями  $f$  розширюється для сумішей з переважним вмістом фракції з розміром частинок 160/100 мкм, але при цьому швидкісний діапазон дії підвищених питомих сил тертя звуужується до меж 4–7 м/с. При підвищених швидкостях MAO – більших 7 м/с зниження величини  $f$  пояснюється виносом з робочої зони дрібної фракції, як результат – зниженням щільності МАІ, загальної площі реального контакту МАІ з оброблюваними поверхнями. Таким чином формується в процесі МАІ композиційний багатошаровий МАІ, для якого притаманним є підвищене внутрішнє тертя біля поверхні полюсних наконечників (зона з переважною кількістю крупної фракції) і зона з підвищеною кількістю дрібної фракції біля оброблюваних поверхонь – з меншим внутрішнім тертям, підвищеною рухливістю МАІ. Час переформування МАІ з сумішей за попередніми оцінками становить 40–80 с. Проте для одержання більш точних даних по кінетиці процесу переформування МАІ з сумішей при MAO необхідно проведення додаткових досліджень. Встановлені особливості переформування МАІ контролювалось візуально по характеру перерозподілення зерен МАМ різних розмірів в робочих щілинах. Більш точні результати можуть бути отримані при дослідженні вмісту окремих фракцій МАІ в залежності від координати ширини робочої щілини.

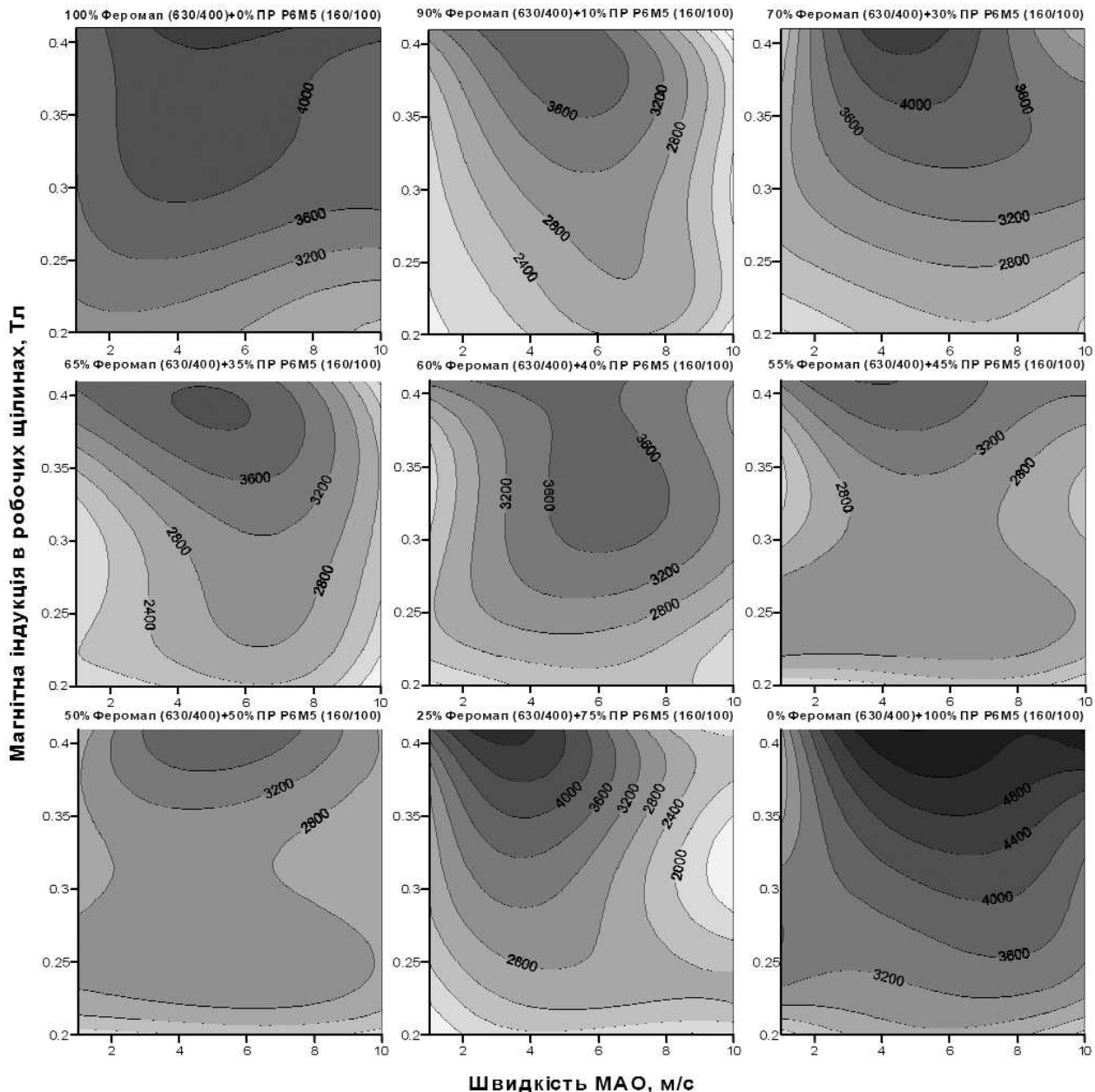


Рис. 5. Зміна питомих сил тертя в МАІ в залежності від магнітної індукції в робочих щілинах і швидкості МАО для різних складів сумішей типу Феромап 630/400 мкм) – ПР Р6М5 (160/100 мкм)

Суміш Феромап (630/400 мкм) – Полімам-М (160/100 мкм).

Результати експериментальних залежностей триботехнічних властивостей МАІ з сумішей порошків Феромап (630/400 мкм) і Полімам-М (160/100 мкм) після їх статистичної обробки було апроксимовано і представлені у формульному вигляді поліномами виду:

$$f(V) = \sum_{i=0}^6 a_i \cdot V^i \quad (1)$$

Значення коефіцієнтів  $a_i$  і середньоквадратичної похибки апроксимації  $S$  для різних складів сумішей наведено в таблиці 2.

Встановлено, що для монодисперсного МАІ з порошку Полімам-М з розміром частинок 160/100 мкм швидкість МАО в межах 1–10 м/с не оказує істотного впливу на величину питомих сил тертя. Аналіз поведінки МАІ з сумішей порошків показав, що наявність в складі сумішей до 10% дрібного порошку Полімам-М призводить до зниження питомих сил тертя. Збільшення зазначеної кількості дрібного порошку понад 10% призводить до монотонної зміни величини  $f$  в залежності від  $B$  і  $V$ . Важливо відзначити, що для МАІ з сумішей, які в своєму складі мають від 5 до 70% дрібної фракції наявність максимуму на залежностях  $f(V, B)$  виявляється при швидкостях



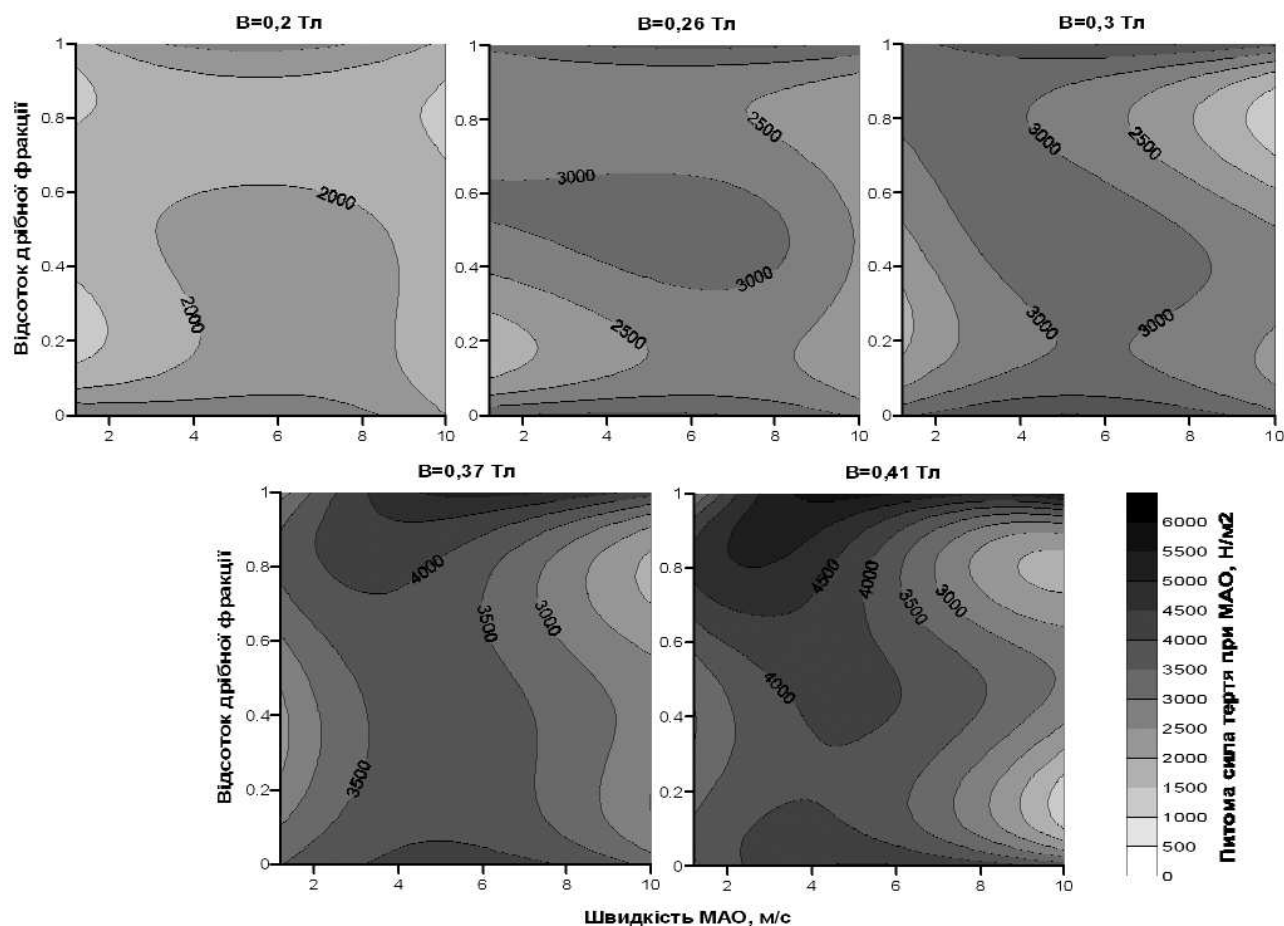


Рис. 6. Зміна питомих сил тертя в МАІ в залежності від швидкості MAO і відсоткового складу сумішей типу Феромап 630/400 мкм) – ПР Р6М5 (160/100 мкм) при фіксованих значеннях магнітної індукції в робочих щілинах

3–6 м/с. При чому чим вище величина  $B$ , тим виявлений максимум більш явно виражений. Пояснення такої поведінки МАІ при MAO досліджуваними сумішами пов'язано з "ефектом підшипника", характерного при використанні сумішей з рівновісних частинок порошків.

*Суміш Феромап (630/400 мкм) – Царамам (160/100 мкм).*

Для дрібного порошку Царамам характерним є значна нерівновісність частинок (коефіцієнт нерівновісності  $k_f = 2,8$ ). При чому частинки мають досить гладку зовнішню поверхню і за своєю формою можуть бути віднесені до округлих частинок [5]. Експериментальні результати залежностей питомих сил тертя МАІ по оброблювальній поверхні від швидкості MAO для різних складів сумішей і магнітній індукції в робочих щілинах наведено на рис. 7. Для МАІ з дрібного порошку Царамам, як і для попередньо досліджених сумішей наявним є три швидкісних діапазони. Дві зони – зони дії низьких швидкостей MAO  $V=1-4$  м/с і зони дії підвищених

швидкостей MAO  $V=7-10$  м/с – зон, в яких визначальний вплив на величину  $f$  оказує магнітна індукція в робочих щілинах, а швидкість MAO впливає слабо. Для третьої зони характерним є суттєвий вплив на величину питомих сил тертя швидкості MAO. Ця зона розташовується в діапазоні  $V=4-7$  м/с. У порівнянні з раніше дослідженими сумішами, сформованими з крупних осколькочастих рівновісних частинок магнітоабразивного порошку Феромап і дрібних, рівновісних, округлих частинок порошків ПР Р6М5, Полімам-М і осколькочастих частинок Феромап, для суміші Феромап (630/400 мкм) – Царамам (160/100 мкм) тенденції зміни функціональної залежності полягають в тому, що не виявляється різких змін в характері поведінки МАІ – різкого зниження величини  $f$  при наявності малої кількості дрібної фракції порошку Царамам в суміші і навпаки. Має місце монотонне зниження  $f$  для сумішей з переважною кількістю крупних частинок. Найбільш активний процес зміни питомих сил тертя виявляється у діапазоні швидкостей

Таблиця 2

Значення коефіцієнтів апроксимації  $a_i$  і середньоквадратичної похибки для сумішей Феромап (630/400 мкм) – Полімам-М (160/100 мкм)

Склад суміші	В, Тл	Коефіцієнти $a_i$							Середньо-квадратична похибка
		$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	
100%Феромап (630/400 мкм) – 0% Полімам-М (160/100мкм)	0,2	540,06	714,83	259,34	-216,00	49,64	-4,77	0,16	1,00
	0,26	1453,90	137,84	557,06	-278,07	57,07	-5,34	0,18	0,98
	0,3	-2911,40	7385,80	-3546,90	854,28	-106,83	6,59	-0,16	1,00
	0,37	-10517,0	17307,00	-8074,30	1890,30	-233,29	14,43	-0,35	0,96
	0,41	-15304,0	25099,00	-12637,0	3207,10	-431,18	29,22	-0,79	0,99
25%Феромап (630/400 мкм) – 75% Полімам-М (160/100мкм)	0,2	656,44	805,73	122,93	-115,22	23,66	-2,02	0,06	0,99
	0,26	1142,20	367,09	627,40	-291,87	52,51	-4,25	0,13	0,99
	0,3	503,65	972,89	523,60	-279,39	48,87	-3,68	0,10	0,99
	0,37	2159,70	-3318,80	3870,0	-1334,6	210,52	-15,68	0,45	0,99
	0,41	-858,13	2806,20	3,34	-183,68	35,80	-2,60	0,06	0,97
50%Феромап (630/400 мкм) – 50% Полімам-М (160/100мкм)	0,2	10,04	1290,90	-268,36	10,16	4,98	-0,71	0,03	0,99
	0,26	172,17	1821,10	-374,02	14,71	4,86	-0,58	0,02	0,99
	0,3	568,79	922,63	521,76	-291,94	53,56	-4,25	0,12	0,99
	0,37	326,88	189,45	1931,3	-880,68	160,21	-13,2	0,41	0,98
	0,41	-134,46	2078,90	630,86	-482,39	99,01	-8,60	0,27	0,98
60%Феромап (630/400 мкм) – 40% Полімам-М (160/100мкм)	0,2	1417,90	463,37	-155,76	69,61	-16,29	1,71	-0,07	0,99
	0,26	2924,90	-1523,60	1435,00	-474,81	74,58	-5,59	0,16	0,99
	0,3	-3250,30	6677,70	-2656,00	545,75	-60,29	3,42	-0,08	0,97
	0,37	-6174,90	10644,00	-4207,90	825,13	-82,76	3,94	-0,07	0,99
	0,41	3334,80	-2632,60	2824,30	-993,54	165,73	-13,36	0,42	1,00
70%Феромап (630/400 мкм) – 30% Полімам-М (160/100мкм)	0,2	-320,83	2167,10	-567,49	35,61	8,34	-1,36	0,05	0,99
	0,26	-797,47	3851,20	-1537,20	319,16	-34,04	1,73	-0,03	0,99
	0,3	3551,10	-1896,10	1588,40	-520,85	85,29	-6,86	0,21	0,99
	0,37	-7115,30	12837,00	-5989,20	1414,20	-173,88	10,51	-0,25	1,00
	0,41	-3919,80	6544,00	-2150,40	367,83	-31,56	1,04	0,00	1,00
80%Феромап (630/400 мкм) – 20% Полімам-М (160/100мкм)	0,2	540,06	714,83	259,34	-216,00	49,64	-4,77	0,16	1,00
	0,26	1453,90	137,84	557,06	-278,07	57,07	-5,34	0,18	0,98
	0,3	-2911,40	7385,80	-3546,90	854,28	-106,83	6,59	-0,16	1,00
	0,37	-10517,00	17307,00	-8074,30	1890,30	-233,29	14,43	-0,35	0,96
	0,41	-15304,00	25099,00	-12637,0	3207,10	-431,18	29,22	-0,79	0,99
90%Феромап (630/400 мкм) – 10% Полімам-М (160/100мкм)	0,2	741,77	1722,00	-1296,2	422,77	-66,13	4,84	-0,13	0,99
	0,26	-3374,50	7362,40	-3887,8	999,79	-132,66	8,66	-0,22	0,99
	0,3	1034,60	1335,70	-717,53	197,30	-27,40	1,77	-0,04	0,99
	0,37	1958,60	259,01	339,98	-169,94	30,51	-2,53	0,08	0,98
	0,41	-5298,00	10474,0	-4675,1	1053,4	-129,76	8,22	-0,21	1,00
95%Феромап (630/400 мкм) – 5% Полімам-М (160/100мкм)	0,2	889,40	1879,80	-1399,7	478,72	-76,47	5,57	-0,15	0,99
	0,26	1730,80	1070,0	-903,05	349,52	-60,67	4,69	-0,13	0,99
	0,3	1120,10	1702,5	-1098,5	398,11	-70,17	5,66	-0,17	0,98
	0,37	2186,90	-1272,3	1540,9	-499,08	69,26	-4,43	0,11	0,98
	0,41	2465,20	8,78	351,64	-65,72	-5,00	1,52	-0,07	0,98
0%Феромап (630/400 мкм) – 100% Полімам-М (160/100мкм)	0,2	-3147,80	7813,60	-3568,20	801,62	-96,16	5,97	-0,15	0,89
	0,26	-3440,70	10302,00	-5276,90	1358,00	-186,91	13,13	-0,37	0,98
	0,3	-11890,00	22208,00	-11517,0	2993,40	-414,28	29,12	-0,82	0,94
	0,37	-17359,00	28553,00	-14058,0	3477,30	-458,00	30,65	-0,82	0,98
	0,41	-9806,20	19058,00	-9434,10	2382,70	-322,84	22,30	-0,62	0,99

МАО – 8–10 м/с, а саме в області де найбільш активно діють пондеромоторні сили, які сприяють процесам циркуляції порошкових частинок в зонах оброблення, формуванню своєрідних вихорподібних утворень. Стереоскопічний аналіз зліпків МАІ [6] показав, що дрібний Царамам, який є в суміші поводить себе дещо "відокремлено", формуючи в складі свої, самостійні ланцюжки зерен, які є прошарками між крупними частинками Феромапу, реалізуючі при цьому

ефект "часткового армування" окремих макрооб'ємів МАІ. Причому формування подібних прошарків з дрібних неравновісних частинок відбувається переважно вздовж силових ліній магнітного поля, в той час як для сумішей Феромап – ПР Р6М5, Феромап – Полімам-М, Феромап – Феромап встановлено формування прошарків і в напрямку перпендикулярному до силових ліній, тобто відбувається обволакування дрібними частинками крупних.

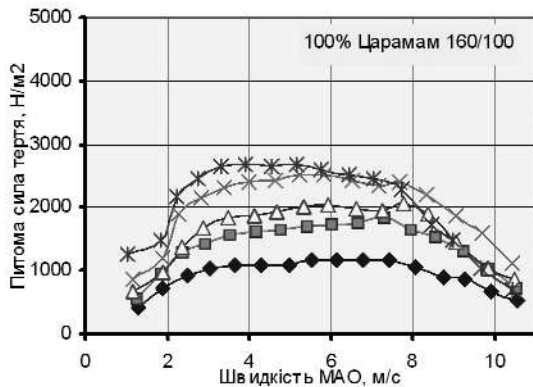
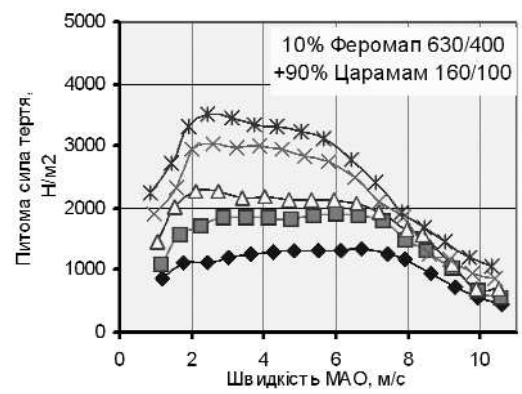
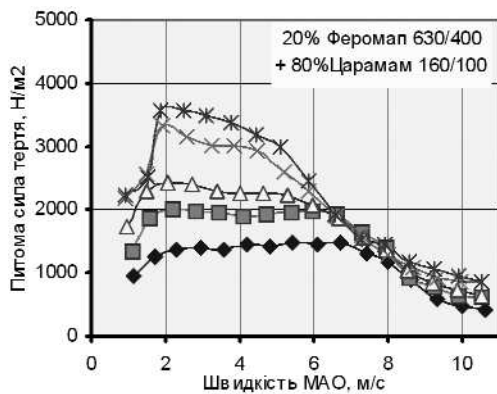
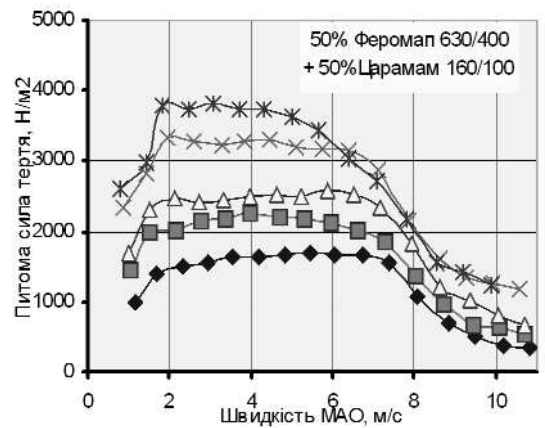
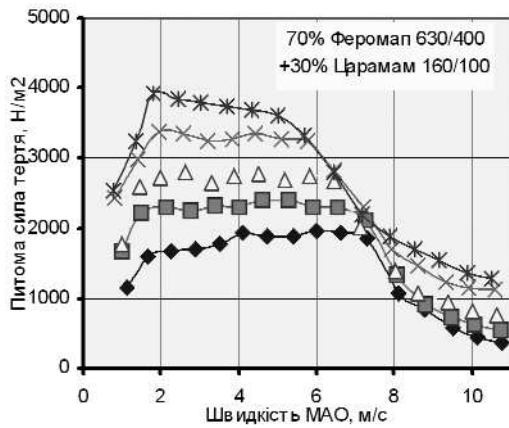
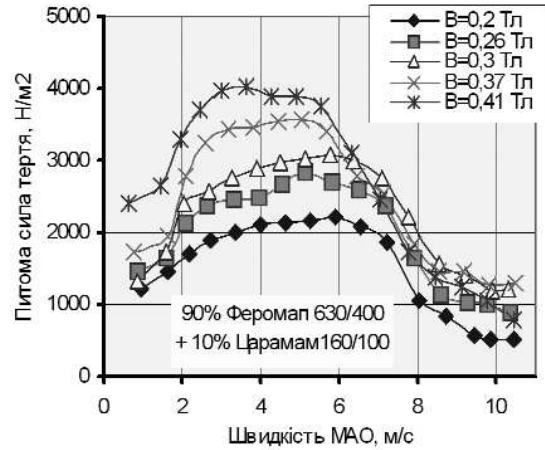
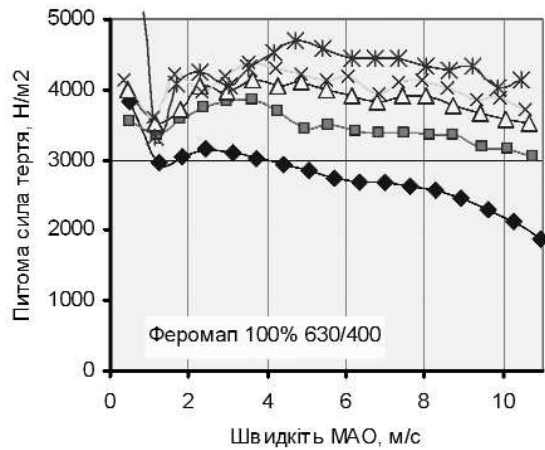


Рис. 7. Залежність питомих сил тертя при МАО від швидкості обробки при різних значеннях магнітної індукції в робочих щілинах для сумішей різного складу з порошкових МАМ Феромап 630/400 (мкм) і Царамам (160/100 мкм)

Суміш Полімам-М (630/400 мкм) – Царамам (160/100 мкм).

Експериментальні результати для зазначеної суміші, наведенні у вигляді топограм залежностей питомої сили тертя від швидкості MAO і магнітної індукції в робочих зонах при MAO (рис. 8) для різних складів сумішей показали, що як і тенденції зміни величини  $f$ , так і формування макроструктури МАІ аналогічно сумішам Феромап (630/400 мкм) – Царамам (160/100 мкм). Різниця полягає переважно в тому, що для суміші Феромап (630/400 мкм) – Царамам (160/100 мкм) швидкісна зона в якій  $f$  залежить суттєво від  $B$  і  $V$  значно ширша і складає 3–7 м/с. Це пояснюється більш високими магнітними властивостями порош-

кового МАМ Полімам-М. Слід відзначити і більш вузьку швидкісну зону, для якої вплив магнітної індукції на величину  $f$  практично відсутній – до 2 м/с. Встановлена поведінка досліджуваних сумішей перш за все пояснюється особливостями структурування МАІ в процесі MAO, аналогічна процесу структурування для МАІ з сумішею Феромап (630/400 мкм) – Царамам (160/100 мкм).

Суміш Царамам (630/400 мкм) – Феромап (160/100 мкм).

МАІ з суміші порошків Царамам (630/400 мкм) – Феромап (160/100 мкм) за своїми властивостями мають найнижчі значення питомих сил тертя при MAO практично для усіх складів

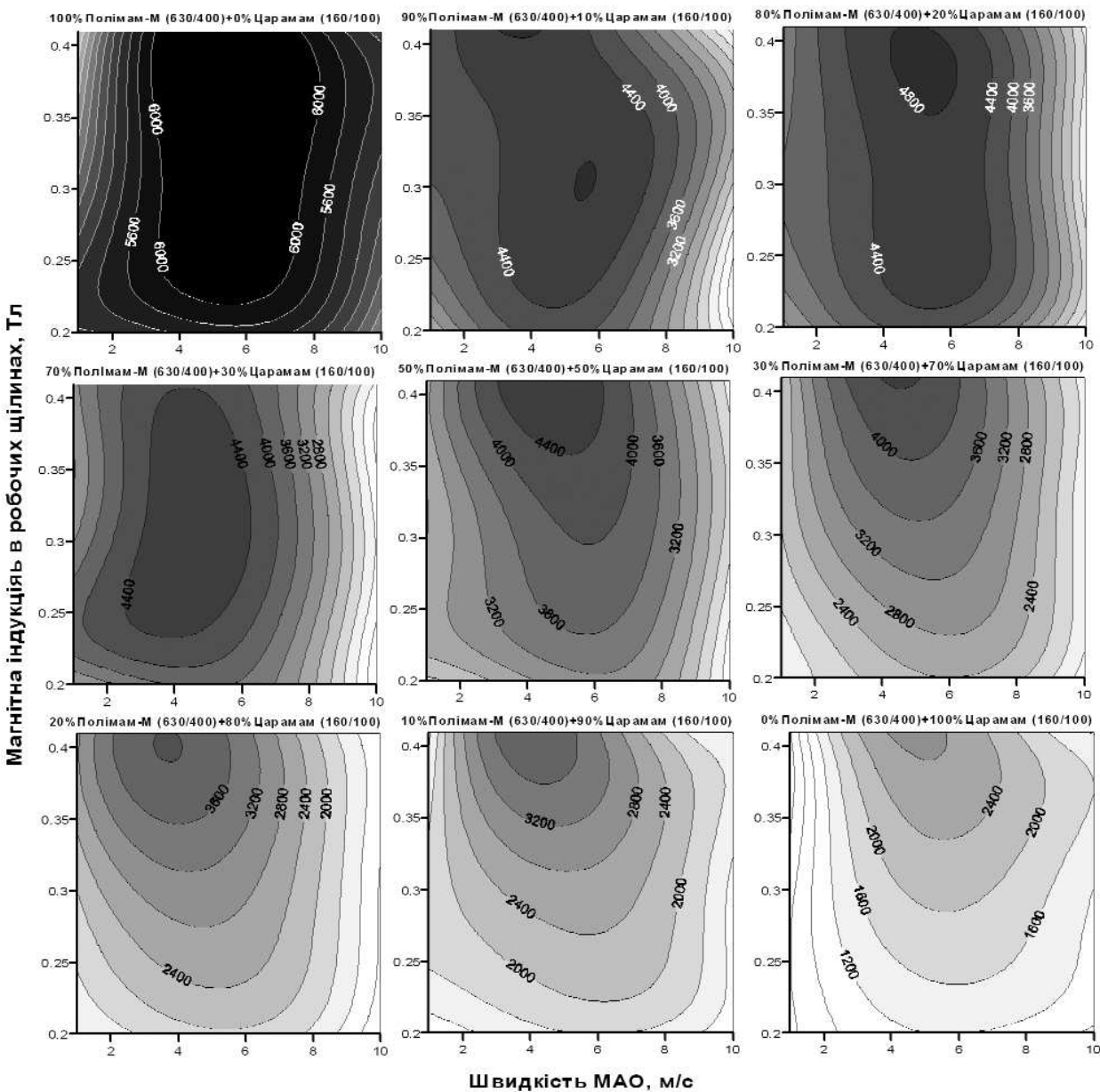


Рис. 8. Зміна питомих сил тертя в МАІ в залежності від магнітної індукції в робочих щілинах і швидкості MAO для різних складів сумішей типу Полімам-М (630/400 мкм) – Царамам (160/100 мкм)

(рис. 9). Встановлено, що при малих швидкостях MAO практично відсутня зона в якій виявляється суттєвий вплив швидкості на величину  $f$ . Діапазон швидкостей для яких характерним є підвищені питомі сили тертя складає 1–4 м/с.

Така поведінка МАІ з досліджуваних сумішей при MAO найбільш типова для умов, коли відтворюється ефект "армування" МАІ нерівновісними крупними частинками порошкового МАМ – Царамам, аналогічній поведінці МАІ з сумішей типу Полімам-М (630/400 мкм) – Царамам (160/100 мкм) і Феромап (630/400 мкм) – Царамам (160/100 мкм).

### Обговорення експериментальних результатів

Аналіз і узагальнення отриманих даних дозволило виконати умовне поділення досліджуваного діапазону швидкостей MAO на три зони, в яких визначено особливості руху, формування і переформування МАІ, сформованого з двохфракційних сумішей порошкових МАМ з розмірами частинок 630/400 і 160/100 мкм, які відрізняються за своєю формою, ступенем нерівності і магнітними властивостями. А саме зона I – в області малих швидкостей –  $V=2-2,5$  м/с, зона III – в області високих швидкостей  $V=7-10$  м/с і зона II – проміжна – при швидкостях MAO 2–7 м/с. Для першої і третьої зон типовим є несут-

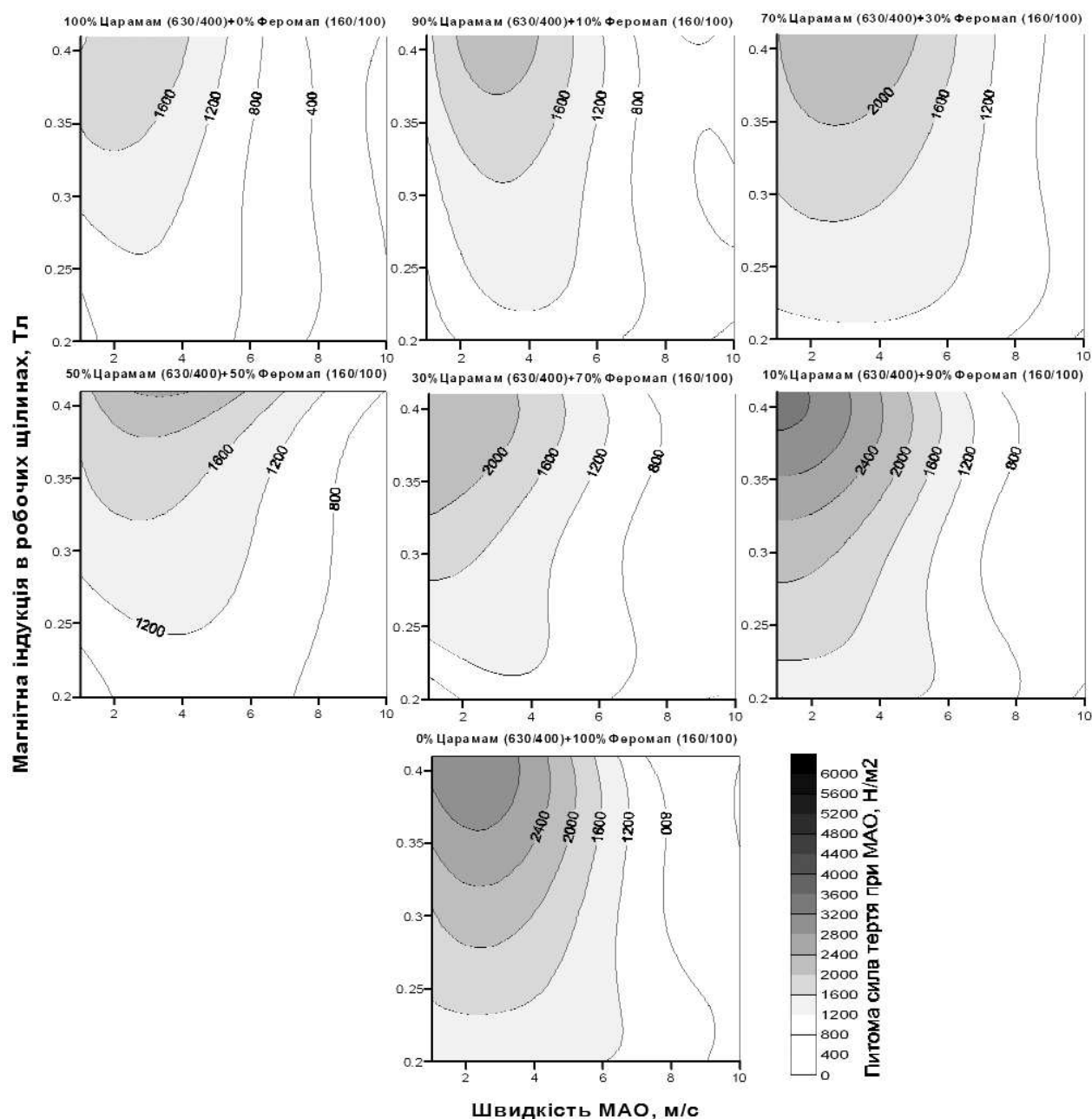


Рис. 9. Зміна питомих сил тертя в МАІ в залежності від магнітної індукції в робочих щілинах і швидкості MAO для різних складів сумішей типу Царамам (630/400 мкм) – Феромап (160/100 мкм)

тєвий вплив величини магнітної індукції в робочих щілинах на значення питомих сил тертя. Для другої зони типовим є підвищений вплив магнітної індукції на величину  $f$ . При цьому характер цього впливу, згідно з даними попередніх досліджень визначається Максвелловськими напруженнями, що виникають в порошковому середовищі при МАО і описується квадратичними залежностями від магнітної індукції. У зв'язку з вище зазначеним, доцільним є уточнення модельного уявлення макроструктури МАІ з сумішей порошкових МАМ, наведених в [3]. Для сумішей, що мають в своєму складі виключно рівновісні порошкови МАМ, в незалежності від їх форми

відбувається обволакування крупних порошоків дрібними. Аналогічна макроструктура МАІ формується і у випадку малої кількості нервновісних частинок крупної фракції і складі МАІ. Процес обволакування крупних частинок дрібними сприяє при МАО відтворенню "ефекту підшипника", при якому спостерігається знижене питомих сил тертя МАІ в парі з оброблюваною поверхнею. Найявність в складі сумішей нервновісних частинок як крупних, так і дрібних в кількості більшої 20–30% сприяє зростанню жорсткості МАІ за рахунок реалізації ефекту повного або часткового "армування". Модельне уявлення МАІ з сумішей наведено на рис. 10. Підтвердженням правомір-

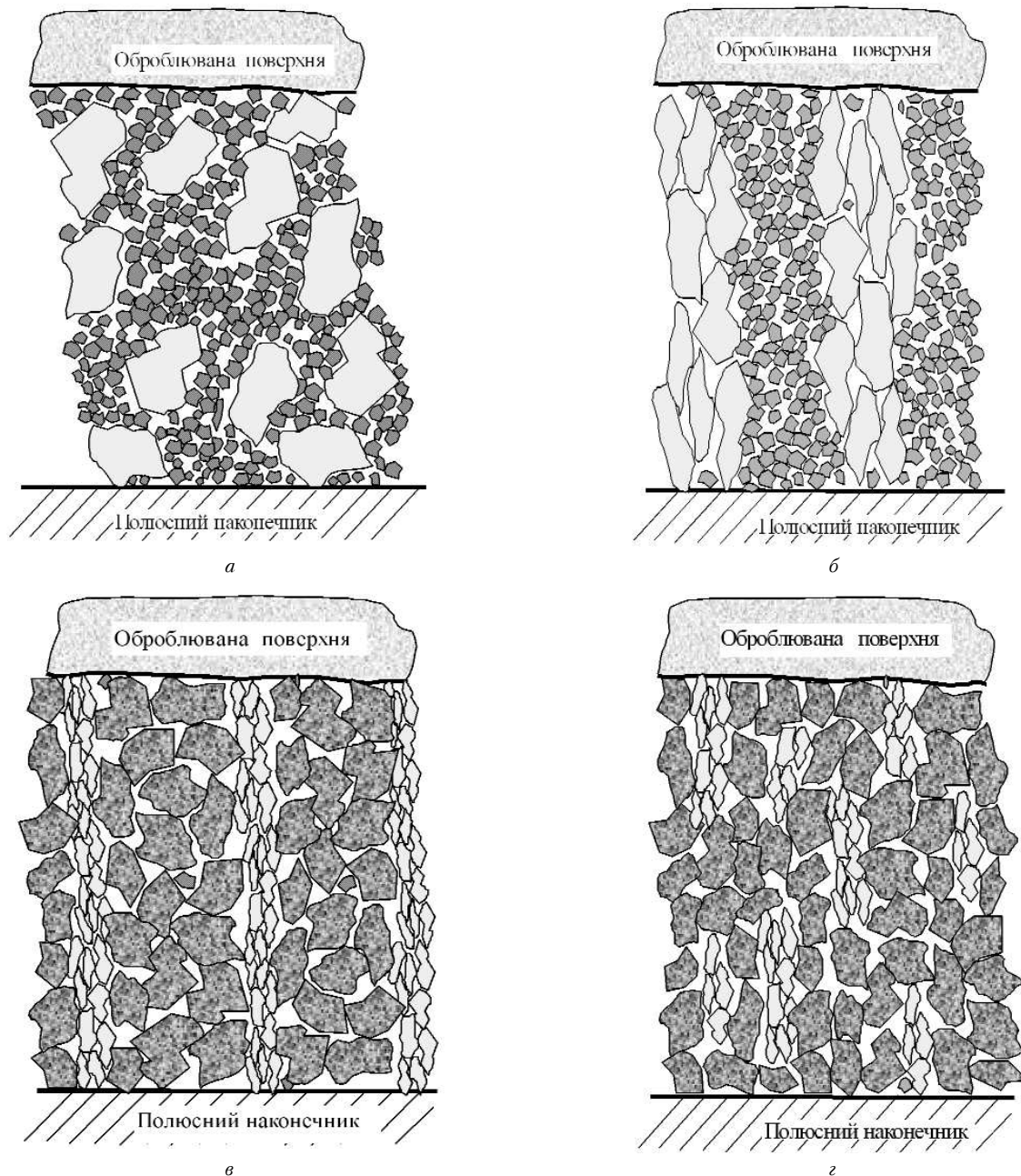


Рис. 10. Модельне уявлення МАІ з сумішей порошоків:

$a$  – реалізація "ефекту підшипника",  $б, в$  – реалізація "ефекту армування",  $г$  – часткова реалізація "ефекту армування"

ності наведених моделей є не тільки вище отримані результати, а і фотографії макроструктур МАІ з сумішей, наведені в [3].

При аналізі особливостей переформування МАІ при різних швидкостях МАО в якості базової моделі було використано модельне уявлення МАІ у вигляді конусоподібних і веретеноподібних квазістабільних формувань частинок МАМ, що утворюються при МАО в умовах великих робочих щілин і незначних значеннях магнітної індукції в робочих зонах.

Для першої зони, згідно моделі, запропонованої в [3] відбувається взаємодія оброблюваної поверхні з вершинами конусоподібних формувань, які своїми основами розташовані на поверхні

полосних наконечників. При цьому зазначенні формування при незначних швидкостях МАО (до 2 м/с) розтягуються і починають вигинатися в напрямку руху деталі, але не розриваються внаслідок їх значної еластичності, рухливості і здатності відновлювати свою форму за рахунок частинок, що розташовані в області поблизу полюсних наконечників (рис. 11, а). Подальше збільшення швидкості МАО (зона дії другої області — більше 2 м/с) призводить до "критичного" подовження сформованих конусоподібних ланцюжків зерен і їх відхилення від переважного напрямку, що співпадає з силовими лініями магнітного поля, в особливості поблизу оброблюваної поверхні. В результаті чого, окремі групи зерен — представницькі об'єми, що розташовані в області вершин конусоподібних формоутворень займають квазістабільні положення вздовж вектора швидкості МАО, майже перпендикулярно до силових ліній магнітного поля (рис. 11, б). В наслідок такого процесу, як групи зерен, так і окремі частинки МАМ починають контактувати з оброблюваною поверхнею не переважно вершинами, а площинами і гранями, що розташовані вздовж їх більших осей, що призводить до збільшення площі фактичного контакту МАІ з поверхнею деталі і, як наслідок, до зростання питомих сил тертя. Витягнуті вздовж оброблюваної поверхні при МАО ланцюжки зерен, в особливості кінцеві елементи і групи частинок, прямують до повернення в область з підвищеною магнітною індукцією — до полюсних наконечників і мінімальною швидкістю — тобто в область енергетичного мінімуму. В результаті чого відбувається

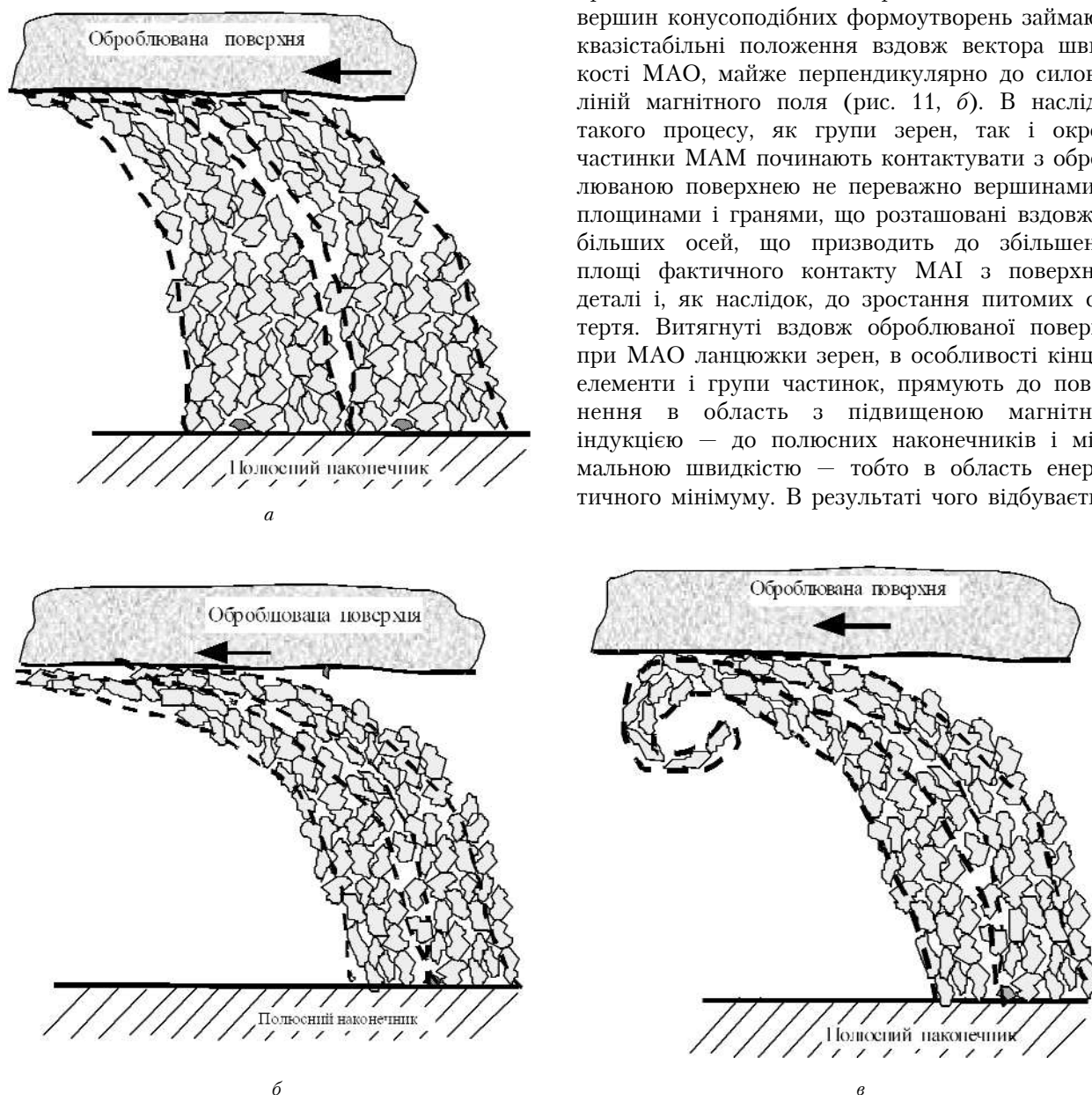


Рис. 11. Схематичне представлення процесу переформування МАІ в робочих зонах в процесі МАО в умовах великих магнітних щілин

закручування кінців ланцюжків і утворення рухливих циклічних, кругових, вихороподібних зон, в яких генеруються мультиплікативні (другорядні) електромагнітні поля, які сприяють до локального збільшення напруженості магнітного поля в окремих зонах магнітних щілин (рис. 11, *в*). Додатково зерна, що контактують з оброблюваною поверхнею і розташовані своїми довгими осями перпендикулярно силовим лініям магнітного поля в результаті контакту з оброблюваною поверхнею починають активно повертатися і активувати обертальний рух частинок МАІ, що розташовані поряд.

За таких умов відбувається активне переміщення МАІ. Частинки з областей, що розташовані поблизу полюсних наконечників, активно "транспортуються" в зону до оброблюваної поверхні і приймають безпосередню участь в процесі МАО. В процесі подібного переформування важливими факторами стають характеристики внутрішнього тертя в МАІ для даного діапазону швидкостей. Така поведінка МАІ притаманна другій зоні.

В третій зоні, при підвищених швидкостях МАО, вихороподібні формування замикаються, формуючи повноцінні кільцеподібні утворення і відриваються від розтягнутих конусоподібних формувань. Це призводить до їх скорочення і вирівнювання вздовж силових ліній магнітного поля. Процес розтягнення, закручування і відриву відбувається періодично. Таким чином можна вважати, що відбуваються коливальні рухи окремих макроструктур МАІ, що призводить до виникнення ефектів псевдозрідження МАІ, які при швидкостях МАО більше 9 м/с проявляють себе у вигляді виносу частини МАІ з робочих зон магнітних щілин. Отриманні експериментальні результати, запропоноване модельне уявлення підтверджують результати теоретичного аналізу особливостей формування і переформування МАІ в умовах великих щілин, наведені в [7] і більш конкретно описують умови, при яких генеруються пондеромоторні сили.

#### Висновки

Визначено особливості переформування МАІ в умовах великих магнітних щілин, запропоновано

уточнену фізичну модель поведінки порошкового середовища в процесі магнітно-абразивної обробки. Досліджено властивості МАІ, який сформовано з двох фракційних сумішей порошкових магнітно-абразивних матеріалів з різними технологічними характеристиками. Визначено умови при яких відбувається псевдозрідження МАІ шляхом реалізації "ефекту підшипника" або підвищення його жорсткості шляхом реалізації "ефекту армування".

#### Література

1. *Сакулевич Ф.Ю.* Основы магнитно-абразивной обработки. — Мн.: Наука и техника, 1981. — 328 с.
2. *Барон Ю.М.* Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущего инструмента. — Л.: Машиностроение. — 1986. — 176 с.
3. *Майборода В.С.* Основы створення і використання порошкового магнітно-абразивного інструменту для фінішної обробки фасонних поверхонь. Дисертація ... докт. техн. наук. — Київ, 2001. — 404 с.
4. *Майборода В.С., Хоменко Е.А.* Исследование триботехнических характеристик ферроабразивных порошков при магнитно-абразивной обработке// Порошковая металлургия. — 2003. — №9/10. — С. 107—113.
5. *Степанов О.В.* Дослідження процесу формування магнітно-абразивного порошкового інструменту для обробки деталей складної форми. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Київ, 1997. — 16 с.
6. *Майборода В.С.* Магнитно-абразивная обработка специальных деталей (на примере лопаток компрессоров ГТД): Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Киев, 1988. — 19 с.
7. *Майборода В.С. Гейчук В.М., Ивановський О.А.* Вплив змашувально-охолоджувальних технологічних середовищ (ЗОТС) на триботехнічні властивості порошкового магнітно-абразивного інструменту //Технологія і техніка друкарства. Збірник наук. праць. НТУУ "КПІ". — 2004. — №4. — С. 56—67.