

Вплив форми оброблюваної деталі на сили опору під час магнітно-абразивного оброблення

Метод магнітно-абразивного оброблення (МАО) є перспективним методом фінішного оброблення деталей складної форми, проте обмеженість інформації щодо процесів та явищ перешкоджає повноцінному використанню методу у промисловості. Для вирішення цієї проблеми необхідні подальші експерименти, особливо спрямовані на дослідження важливого фактора сил, що діють на деталь зі сторони МАІ. В дослідженні були використані зразки у вигляді призматичних стовпців висотою 30 мм та різної форми, виготовлених з пара- та феромагнітного матеріалу з характерними розмірами в поперечному перетині 8, 12 та 16 мм. Форми поперечних перетинів деталей – циліндр, рівнобедрений трикутник та квадрат. Швидкість руху деталей у робочій зоні становила 1–3 м/с, магнітна індукція – 0,1–0,25 Тл. Магнітно-абразивні порошки, з яких був сформований МАІ, – Полімам-М та Полімам-Т зернистістю 200/100 та 400/315 мкм.

Визначено, що форма деталей прямо не впливає на значення сил лобового опору, проте форма суттєво впливає на тиск МАІ на поверхні деталі. Розраховано співвідношення величини питомого опору для деталей різної форми та представлено їх у вигляді коефіцієнта. Проаналізовано причини виникнення таких співвідношень. Показано явища, що відбуваються між полюсними наконечниками та боковими поверхнями деталі під час оброблення деталей великого розміру з феромагнітного матеріалу. Роз'яснено вплив цього явища на силу опору при обробленні. Розроблено рекомендації щодо наступних досліджень.

Ключові слова: магнітно-абразивне оброблення; магнітно-абразивний інструмент (МАІ); МАО в великому магнітному зазорі; сила опору; МАО пара- та феромагнітних деталей.

Актуальність теми. Магнітно-абразивне оброблення є перспективним методом фінішного оброблення деталей. Особливо доцільним є його використання для оброблення деталей складної форми, таких як різальний та медичний інструмент, лопатки ГТД та інші вироби, оскільки магнітно-абразивний інструмент повторює будь-яку форму деталі, що і забезпечує рівномірне та ефективне оброблення. Крім забезпечення якості поверхонь (за параметрами Ra, Rz, t_p), МАО дозволяє покращити фізико-механічні властивості поверхневого шару виробів, забезпечити формування оптимального заокруглення кромки, що є важливим для різального інструменту, лопаток компресорів ГТД [1–4]. Проте широкому використанню методу перешкоджає багатфакторна природа процесу, що ускладнює розуміння механізму процесу оброблення та, як наслідок, знижує його продуктивність.

Одним із вирішальних факторів, що визначають процес МАО, є умови силової взаємодії МАІ з оброблюваними поверхнями, а саме опір руху деталі з боку МАІ, який формується з магнітно-абразивного порошку (МАП) в робочих зазорах у процесі оброблення, особливості контактної взаємодії поверхні деталі з частинками МАП і їх утворення, процеси перемішування МАП та формування їх у квазістабільні формування.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спираються автори. На сьогодні відома обмежена кількість робіт, які присвячені аналізу умов силової взаємодії МАІ з поверхнею деталей під час МАО, особливо в умовах великих магнітних зазорів, що використовують при обробленні деталей складної форми. Виконано теоретичні розрахунки сил, що діють у процесі оброблення [5–6], що дозволили певною мірою прогнозувати процес оброблення та забезпечити визначення раціональних умов. Практичні дослідження наведено в роботах [7–8], проте ці дані отримані під час МАО в умовах малих магнітних зазорів та не є релевантними для умов великих зазорів. Було проведено експерименти, що дали можливість визначити реальні значення нормальних та тангенціальних складових сил, що діють на деталь, при обробленні деталей простої форми [9–10], а саме циліндричних деталей з пара- та феромагнітних матеріалів. Було виявлено характерні особливості процесу МАО, такі як суттєвий вплив магнітних властивостей деталі та магнітної індукції, а також незначний вплив швидкості оброблення в діапазоні швидкостей переміщення – 1–3 м/с.

Обмеженість інформації про сили, що діють з боку МАІ на оброблювану деталь, зумовлює необхідність проведення додаткових досліджень процесу МАО з урахуванням низки технологічних факторів, таких як форма, розмір, матеріал деталі та ін.

Метою дослідження було визначення впливу форми деталі на силу опору, що виникають з боку МАІ при MAO в умовах великого магнітного зазору з урахуванням розмірів та матеріалу деталі, типу МАП, форми і розмірів частинок.

Викладення основного матеріалу. Для виконання поставленої мети було використано вимірвальну схему з використанням тензометричного датчика у вигляді балки, що діє на згин [10]. Дослідження проводили на верстаті з кільцевою ванною діаметром 200 мм, відстанню між полюсними наконечниками 35 мм та висотою робочої зони 30 мм (умови великого магнітного зазору) [9–10] на зразках у вигляді призматичних стовпців висотою 30 мм та різної форми, виготовлених з пара- та феромагнітного матеріалу з характерними розмірами в поперечному перетині 8, 12 та 16 мм. Форми поперечних перетинів зразків зображені на рисунку 1: це – циліндр, рівнобедрений трикутник та квадрат, крім того, квадрат та трикутник розташовувалися як плоскою стороною, так і ребром по відношенню до напрямку їх переміщення. МАІ, що використовувався в дослідженні, був сформований з магнітоабразивних порошків Полімам-М та Полімам-Т з фракціями 400/315 та 200/100 мкм кожен. Швидкість руху деталей у робочій зоні змінювалася в діапазоні 1–3 м/с, а магнітна індукція від 0,1 до 0,25 Тл.

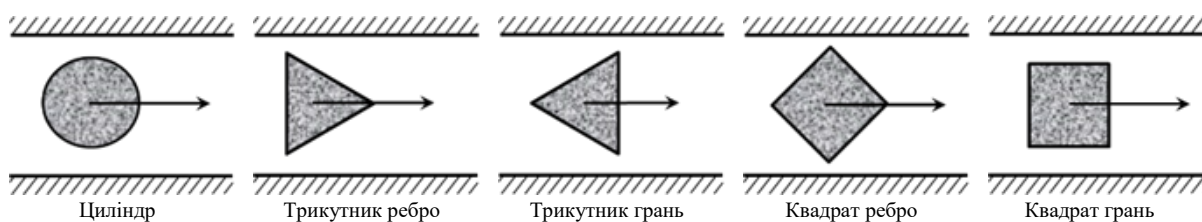


Рис. 1. Форми деталей та особливості їх розташування під час оброблення

Отримані експериментальні результати після їх статистичного оброблення було зведено в гістограми залежності сили опору від швидкості оброблення та величини магнітної індукції. На рисунку 2 зображено типові гістограми для оброблення квадратних деталей різних розмірів з пара- та феромагнітного матеріалу під час використання порошку Полімам-Т з зернистістю 200/100 мкм. Показано, що сила опору суттєво збільшується при збільшенні величини магнітної індукції в робочих зонах та розміру деталей, натомість швидкість руху в межах похибки експерименту суттєво не впливає. Треба зауважити, що при великих швидкостях оброблення (більше за 2,5 м/с) в поєднанні з низькими значеннями магнітної індукції (0,1–0,15 Тл) відбувається певне викидання МАП з робочої зони верстата, аналогічне результатам досліджень, наведених в [3] при MAO циліндричних деталей в умовах малих робочих зазорів, що робить дослідження в таких умовах ускладненим. Магнітні властивості деталей також відчутно збільшують силу опору через взаємодію з порошком та полюсними наконечниками, які формують кільцеву ванну [9–10].

Було проаналізовано вплив форми деталей на процес оброблення і сили опору, які виникають з боку МАІ за різних технологічних параметрів процесу. Визначено різницю значень сили опору з боку МАІ на рух деталей наведених форм і за умов різного їх базування у робочих зонах. Показано, що при MAO зразків з поперечним перерізом у вигляді циліндра, трикутника і квадрата сили опору як не мають значної різниці одне між одним, так і не показують чітких закономірностей, які могли б вказати на певний вплив зміни форми деталі на MAO. Підтвердженням цього є величина різниці в значеннях сили опору. Характерні залежності при обробленні квадратної та циліндричної деталі діаметром 8 мм зі сталі 40X13 наведено на рисунку 3.

Для подальшого аналізу результатів отримані дані були перераховані у відсотковому відношенні та представлені по середньому значенню для кожного типорозміру. Різниця між силами опору, які виникають при MAO різних зразків, порівняно один з одним в середньому становила 3–15 %. Тобто, значення достатньо малі, тому ними можна знехтувати при розгляді характеру силової взаємодії. Виключенням з отриманих результатів є різниця значень сил опору під час оброблення сталевих деталей з характерним розміром 16 мм. Оброблення таких деталей супроводжується різким зростанням сили опору (особливо для квадратної деталі). Візуальний аналіз взаємодії деталі з МАП у робочій зоні при MAO показав, що таке явище пов'язано з ущільненням порошку в зоні між деталлю та полюсними наконечниками, тобто фактично має місце розширення «мертвої» зони шляхом переміщення квазістабільних утворень з МАП в зону між наконечниками та боковими поверхнями деталі

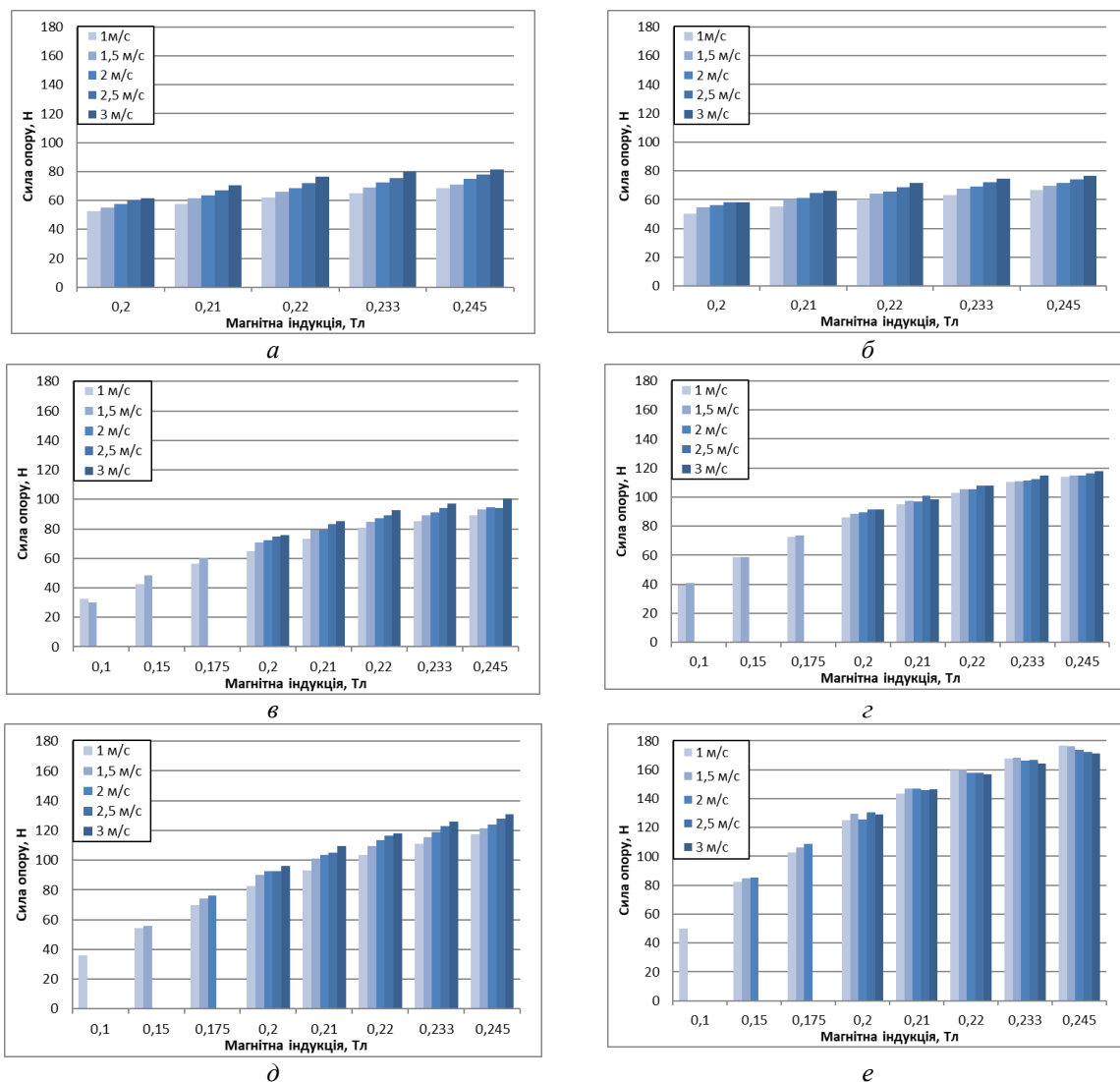


Рис. 2. Гістограми залежності сил опору від швидкості оброблення та величини магнітної індукції під час оброблення квадратних деталей з розмірами 8 (а, б) 12 (в, г) та 16 (д, е) мм з парамагнітного (а, в, д) та феромагнітного (б, г, е) матеріалів з застосуванням порошку Полімам-Т з зернистістю 200/100 мкм

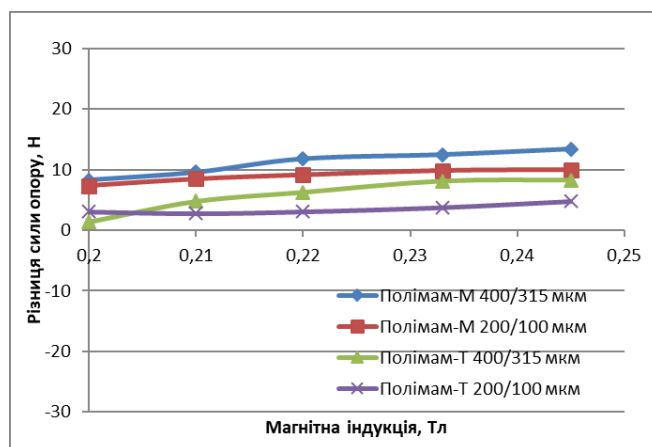


Рис. 3. Різниця у величинах сил опору, що діють з боку МАІ, під час оброблення квадратної та циліндричної деталі діаметром 8 мм зі сталі 40Х13 від величини магнітної індукції, за умов використання різних МАІ

Варто зазначити, що описаний ефект виникає за таких технологічних умов. Рух ущільненого порошку в робочій зоні верстата разом з деталлю реалізує ефект заклинювання, аналогічний ефект при МАО в умовах малих робочих зазорів [3]. Таке явище, ймовірно, залежить від величини бокової поверхні деталі – її розмірів та відстані до полюсних наконечників. Взаємодія феромагнітної деталі з близько розташованими полюсними наконечниками підсилює магнітні зв'язки між частками МАІ, що і створює цей ефект. Це пояснення підтверджується зовнішнім виглядом робочої зони зі зразком, що наведено на рисунку 4. На рисунку 4, а показано оброблення деталі з квадратним перерізом, яка має більшу площу, що взаємодіє з полюсними наконечниками і мертвою зоною в МАІ, що розташована на полюсах. Тому зони ущільненого МАІ при обробленні квадратних деталей більші ніж при обробленні деталей інших форм такого ж характерного розміру (рис. 4, б–г). Це також корелюється з отриманими значеннями сили опору, де найменші значення (для сталевих деталей цього типорозміру) мають місце під час оброблення трикутної деталі при її русі плоскою стороною (рис. 4, в), при обробленні циліндра та трикутника, розташованого ребром (у напрямку руху) значення більші приблизно на 20 %, а оброблення квадратної деталі призводить до суттєвого збільшення (до 70 %) значень сил опору. Також на фотографіях показано, що МАІ охоплює деталь і взаємодіє зі зворотною стороною деталі, що додатково може збільшувати зону ущільнення та збільшувати явище заклинювання МАІ, що в свою чергу збільшує силу опору. Особливо таке явище проявляється на циліндричній деталі (рис. 4, б) та на трикутній, встановленій плоскою стороною під час зустрічного руху деталі (рис. 4, в), форма тильної частини таких деталей забезпечує активне переміщення порошку за деталлю.

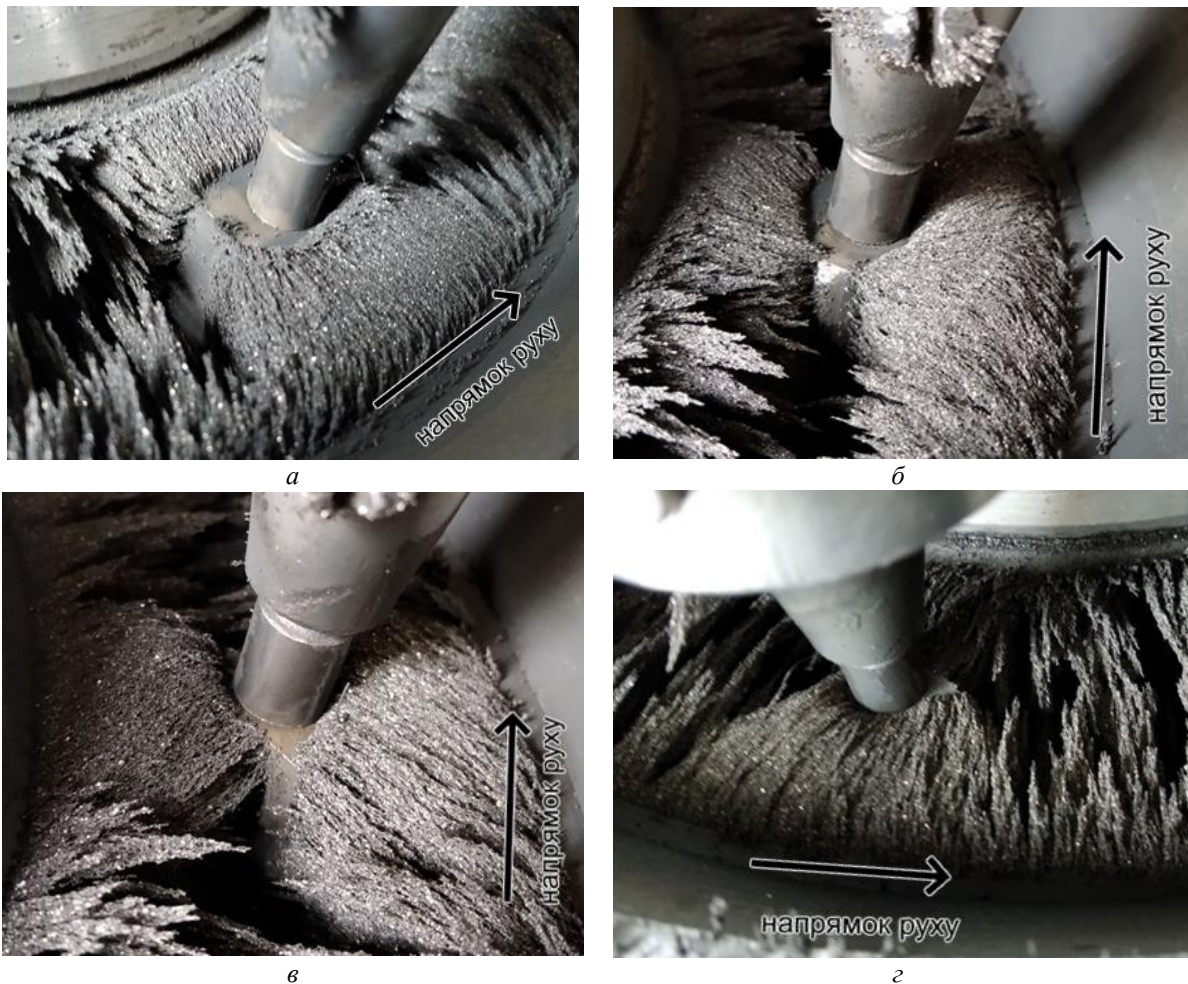


Рис. 4. Явище ущільнення формувань МАІ між полюсними наконечниками та сталеву деталлю з характерним розміром 16 мм: а – квадрат плоска сторона, б – циліндр, в – трикутник плоска сторона, г – трикутник гостра сторона

При обробленні парамагнітних деталей таких самих розмірів наведене явище відсутнє, як і немає значного впливу форми деталі на силу опору. Оброблення парамагнітної деталі показано на фото (рис. 5). Парамагнітна деталь з великою площею бічної поверхні не зумовлює ущільнення формувань МАІ між деталлю та магнітними наконечниками, сформовані в робочій зоні конусоподібні формоутворення МАІ залишаються «закріпленими» на полюсних наконечниках та виконують оброблення різанням бічних

поверхонь. Єдиним суттєвим скупченням порошку є зона перед деталлю, яка власне і створює опір руху деталі під час оброблення.



Рис. 5. Оброблення парамагнітної деталі з характерним розміром 16 мм

Тобто, для феромагнітних деталей силу опору слід розглядати як комплекс магнітної взаємодії та взаємодії тертям, оскільки на оброблення в такому випадку впливає також переформатування та рух часточок МАІ, що може суттєво впливати на значення сил опору. Натомість під час оброблення парамагнітних деталей сила опору розподіляється між фронтальним тиском на деталь і тертям між бічними поверхнями та формоутвореннями МАІ.

На відміну від зміни форми, зміна розміру деталі приводить до суттєвих змін сили опору. В таблиці 1 представлено результати порівняння квадратних та циліндричних деталей зі сталі та титану, де визначено приріст сили опору до приросту розміру деталі. За 100 % були прийняті значення при обробленні деталей з характерним розміром 8 мм. Було перераховано значення сили опору для кожного типу порошку та для кожного представленого значення магнітної індукції. Отримані значення для кожного розміру деталі було представлено у вигляді середнього, мінімального та максимального значень. Для циліндричної деталі зі сталі збільшення розміру відповідає прямо пропорційному збільшенню сили опору (тобто збільшення розміру на 200 % з 8 до 16 мм призводить до збільшення сили на ті ж 200 %), для титанових деталей збільшення розміру веде до збільшення опору, проте з меншим приростом (табл. 1). Залежність сили опору від розмірів квадратних деталей з титану залишається схожою, тобто збільшення розміру веде до суттєвого збільшення опору. Проте опір зростає не пропорційно зі зростанням розміру деталі (так само як і для циліндричних деталей). Для квадратних деталей зі сталі приріст опору є схожим з циліндричними зразками, тобто практично відповідає приросту розміру деталі (табл. 1). Такі особливості пояснюються взаємодією деталі з квазістабільними формуваннями МАІ, що розташовані в різних частинах робочої зони та по-різному впливають на силу опору, а також характер їх взаємодії з феро- та парамагнітними деталями, як показано в роботі [10].

Таблиця 1

Вплив зміни розміру деталі на приріст сили опору під час оброблення

Розмір, мм	Реальне відношення середнє, %	Реальне відношення мін – макс, %	Реальне відношення середнє, %	Реальне відношення мін – макс, %
Квадрат	Сталь		Титан	
12	150	136 – 164	115	108 – 126
16	235	209 – 276	144	127 – 169
Циліндр	Сталь		Титан	
12	144	127 – 169	125	121 – 130
16	208	168 – 262	143	130 – 150

Порівнюючи результати, отримані під час експериментів, можна зробити висновок, що при МАО зміна розміру оброблюваної деталі превалює над зміною форми [10]. Таке явище пояснюється тим, що під час руху деталі в робочій зоні чітко визначених і сталих розмірів, зміна габаритів деталі призводить до інтенсифікації взаємодії поверхні деталі з більшою кількістю формувань МАІ, в тому числі і з «мертвою» зоною ущільненого порошку, що знаходиться на поверхні полюсного наконечника.

Оскільки зміна форми прямо не впливає на силу опору, вона, ймовірно, впливає на характер оброблення та на процес взаємодії оброблюваних поверхонь з МАІ. Тому подальший аналіз становив собою визначення питомого тиску, що діє на оброблювану поверхню деталі. Для цього силу тиску було перераховано через площу поверхні, що безпосередньо зазнає тиску за формулою $P = F/S_{\text{п}}$, де F – визначена в експерименті сила опору, $S_{\text{п}}$ – площа поверхні, що зазнає тиску МАІ (рис. 6).

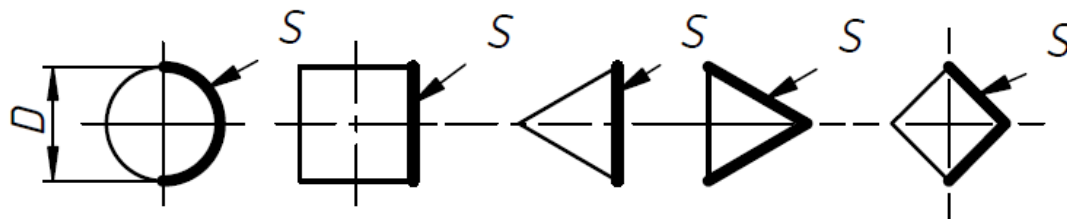
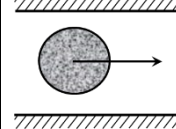
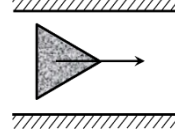
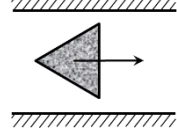
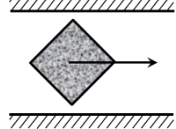
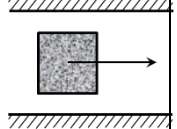


Рис. 6. Поверхні деталей, які зазнають безпосереднього тиску МАІ

Отримані значення дали змогу чисельно порівняти характер питомої сили опору для деталей різної форми шляхом перетворення цих значень на показник коефіцієнта форми. Для отримання співвідношення між кожною із форм отримані результати питомої сили опору було попарно перераховано за формулою $k = P_i/P_j$, де k – співвідношення між формами, P_i та P_j – це значення питомої сили опору для двох деталей різних форм. Далі ці співвідношення були використані для перерахування значень питомого опору у коефіцієнт форми, максимальний коефіцієнт форми прирівнювався до 1, решта визначалася згідно зі співвідношенням. Проте значення при обробленні феромагнітних деталей великого розміру (16 мм) особливо квадратної форми, відрізнялися від значень при обробленні парамагнітних деталей. Тому було вирішено перерахувати коефіцієнт для феромагнітних деталей, прирівнюючи їх до найменшого коефіцієнта, що належав циліндру. Варто зазначити, що результати цих розрахунків залишалися стабільними при зміні значення магнітної індукції, типу та зернистості МАІ. З отриманих під час цих розрахунків значень було знайдено співвідношення питомої сили опору для різних форм (окремо для пара- та феромагнітних матеріалів), які можна вважати фактичним коефіцієнтом форми деталі при дослідженні питомого тиску (табл. 2). Тобто, таким чином з отриманих у дослідженні значень було визначено прямий параметр взаємодії між МАІ та поверхнею оброблюваної деталі, що і показує вплив форми деталі на процес МАО.

Таблиця 2

Коефіцієнт форми деталі для визначення питомого опору при МАО

Форма деталі					
	Циліндр	Трикутник	Трикутник	Квадрат	Квадрат
Коефіцієнт для парамагнітної деталі	0,35	0,45	0,9	0,6	1
Коефіцієнт для феромагнітної деталі	0,35	0,5	0,9	0,5	1,2

Отримані дані було зіставлено з коефіцієнтами форми деталей, що використовують в аеродинаміці [11]. Зазначимо, обидві групи коефіцієнтів мають певну схожість форми. Так найменший коефіцієнт опору обтічності мають деталі циліндричної форми (приблизно 0,4), найбільший – деталі квадратної форми (1–1,2), деталі, що розташовувалися ребром до потоку порошку, мають коефіцієнт (0,6–0,8). Проте аеродинамічний опір та опір середовища МАІ залежать від різних явищ, що мають різну природу виникнення. У випадку аеродинаміки, ці коефіцієнти відповідають опору середовища до руху тіла, що визначається турбулентними чи ламінарними потоками повітря. Для МАО показаний в цьому дослідженні питомий опір виникає від взаємодії оброблюваної деталі з МАІ, формування та руху квазістабільних формоутворень МАІ, взаємодії динамічних та магнітних чинників на оброблення. Також площа поверхні, що зазнає безпосереднього контакту з зернами МАІ, вказує на величину сил тертя, що мають місце при МАО. Власне, більша площа безпосереднього контакту створює більшу взаємодію тертям між МАІ та оброблюваною деталлю. Отриманий вище коефіцієнт форми дозволяє зіставляти та прогнозувати цю взаємодію. Тобто, оцінка розміру та положення поверхонь, що зазнають оброблення (при інших рівних умовах), дозволяє прогнозувати величини сил тертя, що діють у процесі МАО, та

імовірний характер видалення (диспергування) матеріалу (для визначення цього необхідно провести подальші дослідження).

Фактично питома сила тертя залежить від площі, що зазнає тертя, сили опору, та кута цієї площі до вектора накладеної сили (кута тертя). На рисунку 7 схематично показано вектори питомої сили опору, що накладена на оброблювану поверхню деталей різних розмірів. З огляду на положення оброблюваних поверхонь можна припустити, що форма деталі також впливає на величину сил тертя. Тобто, зі збільшенням кута тертя зменшується тангенційна складова тертя між МАІ та поверхнею деталі, що може прямо впливати на характер видалення матеріалу на додачу до впливу від площі контакту. Проте цю думку необхідно підтвердити за допомогою практичних досліджень інтенсивності видалення матеріалу при МАО.

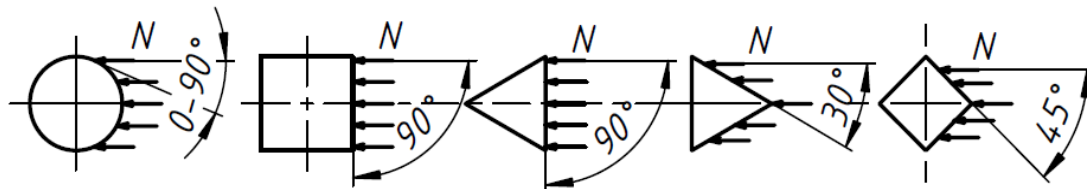


Рис. 7. Положення оброблюваних площин деталей відносно вектора сили опору

Висновки та перспективи подальших досліджень. Дослідження впливу форми деталі на силову взаємодію при МАО показало, що незалежно від форми та розміру деталі вплив індукції магнітного поля значно переважає вплив швидкості руху деталі в робочій зоні (в діапазоні 0,1–0,25 Тл та 1–3 м/с) на силу опору. Збільшення розмірів деталей з титану всіх досліджуваних форм непропорційно впливає на зростання сили опору, що може бути зумовлено взаємодією деталей з різними квазістабільними формоутвореннями МАІ. Під час оброблення феромагнітних деталей великого розміру (16 мм) є явище розширення мертвої зони МАІ на магнітних наконечниках, що залежить від безпосередньої близькості до поверхонь деталі. Форма деталей безпосередньо не впливає на силу опору, проте дослідження питомого опору показало, що співвідношення питомого опору деталей різної форми можна представити у вигляді коефіцієнта, що подібний коефіцієнтам опору в аеродинаміці, незважаючи на різну природу процесів. Такі особливості співвідношення питомого опору, ймовірно, залежать від взаємодії тертя між МАІ та оброблюваними поверхнями деталі, проте для цього необхідно проводити подальші дослідження.

Список використаної літератури:

1. *Майборода В.С.* Основи створення і використання порошкового магнітно-абразивного інструменту для фінішної обробки фасонних поверхонь : дис. ... докт. техн. наук : 05.03.01 / *Віктор Станіславович Майборода*. – Київ, 2001. – 404 с.
2. *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.
3. *Anwesa Barman* Fundamental understanding and latest developments in magnetic field assisted finishing processes. Chapter 17 / *Anwesa Barman, Manas Das* ;Editor(s): *Kapil Gupta, Alokesh Pramanik* // *Advanced Manufacturing. Advanced Machining and Finishing*. – Elsevier, 2021. – P. 611–641. DOI: 10.1016/B978-0-12-817452-4.00018-X.
4. *Kojo Takazawa* Advanced Development of Magnetic-Abrasive Finishing and Its Application / *Kojo Takazawa, Takeo Shinmura, Eiju Hatano* // *Ikutoki Technical University SME Technical Paper*. – MR 85-325. – 1985.
5. *Джулій Д.Ю.* Підвищення якості багатограних непереточуваних тврдосплавних пластин при магнітно-абразивному обробленні в кільцевій ванні : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / *Джулій Дмитро Юрійович*. – Київ, 2014. – 175 с.
6. *Тарган Д.В.* Підвищення якості мітчиків із швидкорізальної сталі магнітно-абразивним методом : дис. ... докт. філософії / *Тарган Дмитро Валентинович*. – Київ, 2021. – 165 с.
7. *Singh D.K.* Experimental investigations into forces acting during a magnetic abrasive finishing process / *D.K. Singh, V.K. Jain, V.Raghuram* // *Int J Adv Manuf Technol*. – 2006. – № 30. – P. 652–662.
8. *Yamaguchi H.* Study of an internal magnetic abrasive finishing using a pole rotation system / *H.Yamaguchi, T.Shinmura* // *Precision Engineering*. – 2000. – Vol. 24, No. 3. – P. 237–244. DOI: 10.1016/S0141-6359(00)00037-4.
9. *Жук Р.Б.* Особливості взаємодії магнітно-абразивного інструменту з оброблюваною поверхнею в умовах кільцевої ванни / *Р.Б. Жук, В.С. Майборода, К.О. Заставський* // *Технічна інженерія*. – 2021. – С. 3–13. DOI: 10.26642/ten-2021-2(88)-3-13.
10. *Заставський К.* Вплив розміру деталей на сили лобового опору при магнітно-абразивному обробленні / *К.Заставський, В.Майборода* // *Mechanics and Advanced Technologies*. – 2022. – № 6 (2). – С. 168–177. DOI: 10.20535/2521-1943.2022.6.2.264410.
11. *Gudmundsson Snorri* General Aviation Aircraft Design : Applied Methods and Procedures / *Snorri Gudmundsson*. – First ed. – Oxford UK : Butterworth-Heinemann, 2014. DOI: 10.1016/C2011-0-06824-2.

References:

1. Maiboroda, V.S. (2001), «Osnovy stvorennia i vykorystannia poroshkovoho mahnitno-abrazyvnoho instrumentu dlia finishnoi obrobky fasonnykh poverkhon», D.Sc. Thesis of dissertation, 05.03.01, Kyiv, 404 p.

2. Tkachuk, I.V. (2015), «Formuvannia mahnitno-abrazyvnoho instrumentu zi stabilnymy vlastyvostiamy v robochyykh zazorakh kiltsevoho typu», Ph.D. Thesis of dissertation, 05.03.01, Kyiv, 164 p.
3. Anwesa, Barman and Manas, Das (2021), «Fundamental understanding and latest developments in magnetic field assisted finishing processes», Chapter 17, in Kapil, Gupta, Alokesh, Pramanik (ed.), *Advanced Manufacturing, Advanced Machining and Finishing*, Elsevier, pp. 611–641, doi: 10.1016/B978-0-12-817452-4.00018-X.
4. Koja, Takazawa, Takeo, Shinmura and Eiju, Hatano (1985), «Advanced Development of Magnetic-Abrasive Finishing and Its Application», *Ikutoki Technical University SME Technical Paper*, MR 85-325.
5. Dzhulii, D.Yu. (2014), «Pidvyshchennia yakosti bahatohrannykh neperetochuvanykh tverdospavnykh plastyn pry mahnitno-abrazyvnomu obroblenni v kiltsevii vannii», Ph.D. Thesis of dissertation, 05.03.01, Kyiv, 175 p.
6. Tarhan, D.V. (2021), «Pidvyshchennia yakosti mitchykyv iz shvydkorizalnoi stali mahnitno-abrazyvnyim metodom», Ph.D. Thesis of dissertation, Kyiv, 165 p.
7. Singh, D.K., Jain, V.K. and Raghuram, V. (2006), «Experimental investigations into forces acting during a magnetic abrasive finishing process», *Int J Adv Manuf Technol*, No. 30, pp. 652–662.
8. Yamaguchi, H. and Shinmura, T. (2000), «Study of an internal magnetic abrasive finishing using a pole rotation system», *Precision Engineering*, Vol. 24, No. 3, pp. 237–244, doi: 10.1016/S0141-6359(00)00037-4.
9. Zhuk, R.B., Maiboroda, V.S. and Zastavskiy, K.O. (2021), «Osoblyvosti vzaємodii mahnitno-abrazyvnoho instrumentu z obrobluvanoiu poverkhneiu v umovakh kiltsevoi vannii», *Tekhnichna inzheneriia*, pp. 3–13, doi: 10.26642/ten-2021-2(88)-3-13.
10. Zastavskiy, K. and Maiboroda, V. (2022), «Vplyv rozmiru detalei na syly lobovoho oporu pry mahnitno-abrazyvnomu obroblenni», *Mechanics and Advanced Technologies*, No. 6 (2), pp. 168–177, doi: 10.20535/2521-1943.2022.6.2.264410.
11. Gudmundsson, Snorri (2014), *General Aviation Aircraft Design: Applied Methods and Procedures*, First ed. Butterworth-Heinemann, Oxford UK, doi: 10.1016/C2011-0-06824-2.

Заставський Костянтин Олегович – аспірант Національного технічного університету України «КПІ імені Ігоря Сікорського».

<https://orcid.org/0000-0002-3372-369X>.

Наукові інтереси:

- магнітно-абразивна обробка;
- реологія порошкових середовищ в магнітному полі;
- технології машинобудування.

Майборода Віктор Станіславович – доктор технічних наук, професор Національного технічного університету України «КПІ імені Ігоря Сікорського».

<https://orcid.org/0000-0001-6902-6928>.

Наукові інтереси:

- фізика процесів різання;
- фінішна обробка;
- магнітно-абразивна обробка;
- реологія порошкових середовищ в магнітному полі.

Zastavskiy K.O., Maiboroda V.S.

The influence of the shape of the processed detail on the resistance forces during magnetic abrasive machining

The method of magnetic abrasive machining (MAM) is a promising method of finishing parts of complex shape, however, limited information about processes and phenomena prevents the full use of the method in industry. To solve this problem, further experiments are necessary, especially aimed at the study of an important factor of the forces acting on the detail from the MAT side. Samples in the form of prismatic columns with a height of 30 mm and different shapes, made of para- and ferromagnetic material with characteristic cross-sectional dimensions of 8, 12 and 16 mm were used in the research. The shapes of the cross-sections of the parts are a cylinder, an isosceles triangle and a square. The speed of movement of parts in the working area was 1-3 m/s, magnetic induction 0.1-0.25 T. Magnetic-abrasive powders from which MAT was formed are Polymam-M and Polymam-T with grain sizes of 200/100 and 400/315 microns. It was determined that the shape of the parts does not have a direct effect on the value of the resistance forces, however, the shape significantly affects the pressure of the MAT on the surface of the part. The ratio of the value of the specific resistance for parts of different shapes was calculated and presented in the form of a coefficient. The reasons for the occurrence of such ratios are analyzed. The phenomena that occur between the pole tips and the side surfaces of the part during the processing of large-sized parts made of ferromagnetic material are shown. The influence of this phenomenon on the strength of resistance during processing is explained. Recommendations for further research have been developed.

Keywords: magnetic abrasive machining; magnetic abrasive tool (MAT); MAM in large magnetic gap; resistance force; MAM of para- and ferromagnetic details.

Стаття надійшла до редакції 30.08.2023.