

Вплив розміру деталей на сили лобового опору при магнітно-абразивному обробленні

К.О. Заставський¹ • В.С. Майборода¹

Received: 9 September 2022 / Accepted: 1 October 2022

Анотація. Метод магнітно-абразивного оброблення (МАО) є ефективним методом фінішного оброблення деталей. Особливо доцільний при обробленні відповідальних деталей складної форми, таких як різальний інструмент, лопатки ГТД, вироби медичного призначення та ін. МАО дозволяє впливати на якість обробленої поверхні, поверхневу твердість, мікрогеометрію різальних кромок (для різального інструменту), рівень залишкових напружень в матеріалі деталі. Відносна новизна методу та, звідси, мала обізнаність в процесах та явищах що має місце при МАО обмежує широке використання методу у виробництві. Недостатня обізнаність в характері МАО, особливо щодо сил, які виникають при МАО в результаті взаємодії оброблюваної деталі та середовища магнітно абразивного інструменту (МАІ). Наявні роботи у цій галузі надають лише базові відомості і не є достатніми для всебічного дослідження МАО. Особливо це стосується впливу розміру деталі на особливості реалізації процесу оброблення.

Проведення досліджень по обробленню деталей різних розмірів та визначення сил та явищ що супроводжують МАО.

Для реалізації поставленої мети було використано пристосування з динамометричним датчиком що дозволив виконати вимірювання сил лобового опору МАІ руху деталі. У дослідженні використовували циліндричні зразки різних діаметрів (8, 12 та 16 мм), виготовлені з феромагнітного та парамагнітного матеріалів. Порошки що використовувались Полімам-М та Полімам-Т (зернистість 400/315 мкм, 200/100 мкм). Швидкість руху варіювалась в діапазоні 1–3 м/с, індукція магнітного поля: 0,20–0,24 Тл.

Встановлено, що для зазначених умов оброблення вплив величини індукції магнітного поля переважає над впливом швидкості руху деталей. Показано вплив розміру деталей на характер МАО, визначено особливості оброблення окремими структурними формуваннями МАІ та різницю між ними. Розглянуто питання коливання величини сили опору при МАО та вплив на них швидкості руху.

Визначено вплив технологічних параметрів процесу МАО на сили лобового опору з боку МАІ при обробленні деталей різних діаметрів і виготовлених з матеріалів з різними магнітними властивостями, визначено подальші напрямки досліджень.

Ключові слова: Магнітно-абразивне оброблення (МАО), Магнітно-абразивний інструмент (МАІ), МАО в великому магнітному зазорі, сила опору.

Вступ

Метод магнітно-абразивного оброблення зарекомендував себе як ефективний метод фінішного оброблення деталей складної форми таких як різальний інструмент, вироби медичного призначення, лопатки ГТД та ін. Цей метод дозволяє не тільки забезпечувати необхідну якість оброблюваних поверхонь (за пара-

метрами R_a , R_z та t_p), а також і формувати раціональні радіуси округлення різальних кромок (для різального інструменту) та покращувати якість деталі шляхом збільшення мікротвердості поверхневих шарів та формування в них певного рівня стискаючих залишкових напружень, що підвищує доцільність використання МАО, як фінішної операції для виправлення недоліків які можуть утворюватися на попередніх технологічних операціях. Використання магнітного поля у вигляді зв'язки для абразивних зерен дозволяє створювати магнітно-абразивний інструмент (МАІ), форма якого повністю відтворює форму поверхні деталі, що є особливо корисним для оброблення виробів складної форми [1–3]. Багатофакторність процесу (використання фероабразивних зерен і магнітного поля, що представляє собою

✉ К. О. Заставський
zastavskiy96@gmail.com

В. С. Майборода
maiborodavs@gmail.com

¹ КПІ імені Ігоря Сікорського, Київ, Україна

віртуальну “зв’язку”) створює складнощі в дослідженні процесів та явищ, що виникають при МАО, та, як наслідок, ускладнюють ефективне застосування методу. Особливо важливим є отримання вичерпної інформації про сили, які виникають в процесі оброблення. Це дозволить точніше прогнозувати результати оброблення та підвищити ефективність методу загалом [1].

Аналіз попередніх публікацій

Перші результати про сили, що діють з боку МАІ на оброблювану поверхню і супроводжують МАО, були наведені в роботі [4]. Було визначено основні технологічні фактори процесу обробки та їх приблизний розподіл по величині. Відмічено суттєвий вплив механічних та магнітних сил на спеціальні характеристики при МАО з переважаючим впливом саме магнітної складової. Проте, ця інформація отримана при МАО в умовах малих магнітних зазорів, які суттєво відрізняються від умов великих зазорів [3]. Вважається, що для великих магнітних зазорів головну роль у силових процесах відіграє динамічний чинник, тобто рух, формування і переформування МАІ. Натомість для малих магнітних зазорів основний вплив відіграють сили магнітного походження [1]. В [5] показано, що силовий вплив з боку МАІ при магнітно-абразивному обробленні деталей типу площин, тіл обертання в умовах малих магнітних зазорів за кінематикою процесу значно відрізняється від кінематики оброблення деталей складних просторових конфігурацій в умовах великих магнітних зазорів.

У останніх роботах [6–7] було зосереджено увагу на визначенні сил, що діють з боку МАІ на оброблювані поверхні при МАО в великих магнітних зазорах. Було встановлено реальні величини сил тиску та тангенційних сил, що виникають при додатковому обертанні циліндричних деталей навколо своєї осі за умов зміни таких технологічних параметрів як швидкість робочих рухів, величина магнітної індукції, матеріал деталі, тип та зернистість магнітно абразивного порошку. Роботи дозволили наочно встановити основні закономірності впливу різних факторів на процес МАО, але не включали в себе дослідження впливу форми та розмірів оброблюваної деталі на зміну зазначених параметрів при МАО [6–7].

У роботах [1, 8] наведено результати досліджень, що були сконцентровані на особливостях і умовах формування стабільного МАІ при обробленні деталей різного розміру. Проте в них відсутня конкретна інформація що до впливу розмірів деталі на величини силової взаємодії між МАІ і оброблюваними поверхнями, хоча наведене створює певне розуміння процесів і закономірностей, що виникають при обробленні.

В дослідженнях [3, 8–10], в яких показані теоретичні кінематичні розрахунки процесів, що вказують на певні базові процеси за закономірності, що мають

місце при МАО. Проте, ці роботи не дозволяють визначити величини силового впливу з боку МАІ на поверхні, що оброблюють в реальних умовах.

Мета

Визначення впливу розмірів деталі на сили, що виникають в процесі МАО при взаємодії МАІ з оброблюваними поверхнями з урахуванням зміни технологічних параметрів. Визначення відмінності процесів та явищ, що виникають при МАО деталей різного розміру та виготовлених з різних матеріалів.

Методологія

В дослідженні було використано установку для МАО, що являє собою модифікований вертикально фрезерний верстат, на столі якого розміщена магнітна система з кільцевою ванною діаметром 200 мм та шириною 35 мм. Такі параметри робочої зони відповідають умовам великого магнітного зазору [1, 3, 8].

Для експерименту було використано циліндричні зразки діаметрами 8, 12 та 16 мм (висотою 30 мм) з феромагнітної сталі 40×13 та парамагнітного титану ВТ8. Такий вибір матеріалів зразків зумовлений отриманими в роботах [6, 7] результатами, що вказують на ідентичний характер оброблення матеріалів з близькими магнітними властивостями. Зразки встановлювались паралельно до осі обертання шпинделя верстата. Встановлювались зразки через спеціальну оправку з динамометричним датчиком, що фіксував навантаження, яке сприймає деталь при русі в середовищі МАІ, та передавав данні до ПК з частотою 10 Гц де, в свою чергу, ці данні записувалися в файл формату .txt для подальшого оброблення та аналізу [7]. Для формування МАІ було використано магнітно-абразивні порошки типу Полімам-Т – зерна осколької форми, Полімам-М – зерна округлої форми з зернистістю 400/315 мкм та 200/100 мкм. Зразки рухались в кільцевій ванні у середовищі МАІ зі швидкістю, що змінювали в діапазоні 1–3 м/с. Індукція магнітного поля змінювали в діапазоні 0,20–0,24 Тл. Для підтримки стабільного середовища МАІ було застосовано немагнітний відновлювальний стержневий елемент (ВСЕ) [8].

Результати досліджень та їх аналіз

Було досліджено сили опору для всіх експериментальних зразків (пара- та феромагнітних), зі зміною технологічних параметрів, таких як розмір та тип МАІ, швидкість оброблення, величина індукції магнітного поля.

Отримані данні було згруповано у вигляді гістограм (рис. 1), що показують залежність сили лобового опору порошку рухової деталі від швидкості руху, та величини магнітної індукції. Загалом було отримано

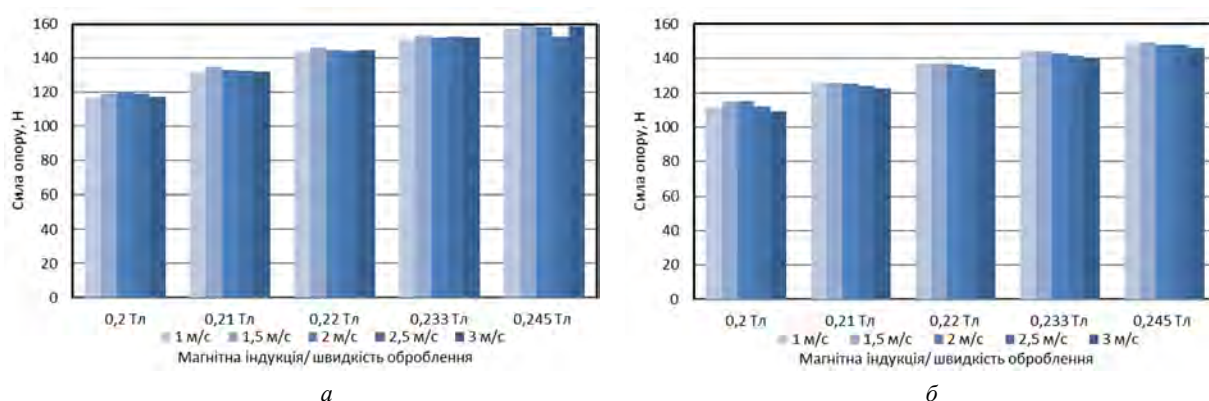


Рис. 1. Гістограми залежності зміни величини сил опору від швидкості руху та магнітної індукції на прикладі зразків з *а*) титану ВТ8, *б*) сталі 40Х13 діаметром 12 мм при МАО порошком Полімам-М з розміром частинок 400/315 мкм

данні для кожної ітерації експерименту, через їх достатню типовість, наведено найбільш характерні.

При обробленні сталі 40Х13 та титану ВТ8 при зазначених вище технологічних параметрах МАО діапазон зміни величин сил лобового опору становив 46–211 Н. При цьому було визначено наступні особливості. Встановлено, що швидкість МАО не має суттєвого прямого впливу на зміну сили опору як для феро-, так і для парамагнітного матеріалу (рис. 1). Це вказує або на повну невідповідність процесу до законів гідродинаміки, або на специфічні явища, які відбуваються в МАІ при МАО, пов'язані з інтенсифікацією процесів розрідження та перемішування при збільшенні швидкості руху деталей, що нівелює зростання тиску зумовлене зростанням швидкості аналогічно до формування гідравлічного опору.

Вплив індукції стабільний для всіх випадків (рис. 1). Збільшення сил опору зростає прямо пропорційно до збільшення індукції магнітного поля. Це вказує на пряму залежність сили від збільшення жорсткості МАІ, що не залежить від інших факторів [4–7].

Відзначимо, що при проведенні тестових експериментів за умов вільних від порошку робочих зон установки, але з встановленим сталевим зразком і підключеним магнітним полем має місце незначне відхилення від нульового положення показників на динамометричному датчику – до 0,4 Н, що можна віднести до похибки експерименту, пов'язану з вібрацією зразка.

Встановлено, що збільшення розміру фракції магнітно-абразивного порошку стабільно призводить до збільшення сили опору. Для детальнішого дослідження механізмів впливу розміру порошку величину сили опору було проведено наступні розрахунки: прийнято, що у середньому, розмір частинок порошку зернистості 400/315 мкм становить 140% від розміру частинок 200/100 мкм. Отримані значення сили опору були перераховані за тим самим принципом і показані в таблиці 1.

В таблиці показано, що відносна зміна значень сили опору в залежності від зернистості порошку становить близько 120–160% у порівнянні з дрібнозернистим порошком. Це дозволяє стверджувати, що збільшення сили на 40% практично пропорційно до збільшенню розмірів частинок порошку. Що вказує на пряму залежність тиску зерна на деталь від його розміру. Отриманий зв'язок не відноситься до оброблення деталі діаметром 8 мм (як сталь так і титан). Таке явище може пояснюватися тим, що між деталлю малого розміру та полюсними наконечниками магнітної системи верстата має місце великий магнітний зазор, що сприяє інтенсифікації процесів переформування МАІ та нівелює процеси пов'язані з заклинюванням порошку, тобто переважаючим впливом динамічних характеристик на процес МАО. Додатково було визначено, що вплив розміру зерен зменшується при збільшенні швидкості оброблення особливо при обробленні деталей діаметром 8 мм (рис. 2).

Таблиця 1. Порівняння різниці розміру зерен порошку та різниці в силах лобового опору, при МАО

Матеріал деталі	Марка порошку	Різниця в зернистості порошку, %	Діаметр деталі		
			8 мм	12 мм	16 мм
			Різниця в силах опору, %		
Титан ВТ8	Полімам-М	140	152	148	143
	Полімам-Т	140	134	149	137
Сталь 40Х13	Полімам-М	140	164	138	124
	Полімам-Т	140	141	130	126

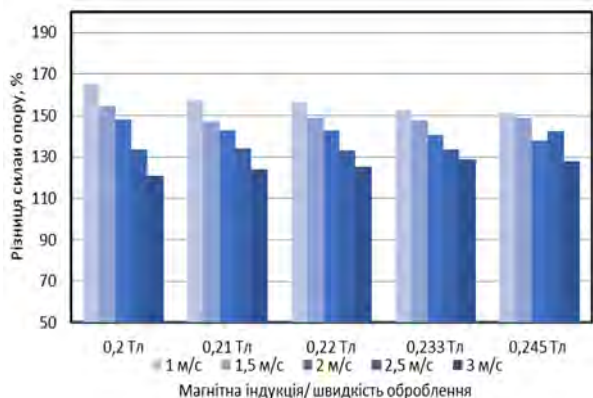


Рис. 2. Різниця сили опору між порошками Полімам-Т з зернистістю 400/315 та 200/100 залежності від швидкості оброблення та величини магнітної індукції при обробленні деталі діаметром 8 мм з сплаву титану ВТ8

Що стосується впливу типу порошку на значення сили опору, то загалом, при обробленні порошком Полімам-М сила тиску більша ніж при обробленні порошком Полімам-Т (на 10–30%). Це може бути зумовлено більшою намагніченістю частинок МАІ сформованого з порошку Полімам-М (на 10% у порівнянні з Полімам-Т), що зумовлює більш суттєві магнітні

зв'язки між часточками МАІ [3]. Додатково, порошок Полімам-М має більші (на 40% у порівнянні з Полімам-Т) значення внутрішнього тертя в парі МАІ-МАІ, що також може зумовлювати такі результати [3]. Проте при обробленні сталевих деталей діаметром 8 мм сила тиску не має чіткої залежності від типу порошку та може залежати від процесу переформування порошку в зазорі між деталлю та полюсними наконечниками (заклинювання, перемішування і т д), що зумовлено більшим по відношенню до деталей діаметром 12 і 16 мм магнітним зазором.

Результати дослідження показують, що збільшення діаметру призводить до збільшення сили опору як при обробленні сталі 40Х13, так і титану ВТ8 (рис. 3).

Зміна сили тиску повинна прямопропорційно залежати від зміни розміру деталі, тобто збільшення розміру деталі в 2 рази, має призводити до збільшення сили у ті ж самі 2 рази. Для того щоб це перевірити, було проведено відсотковий перерахунок отриманих значень сили тиску відносно деталей діаметром 8 мм (як сталі, так і титану). Значення при обробці цих деталей були взяті за 100%.

В таблиці 2 показано аналіз приросту сили лобового опору від зростання величини діаметру деталі. Було визначено, що отримані результати не корелюють з зазначеним вище.

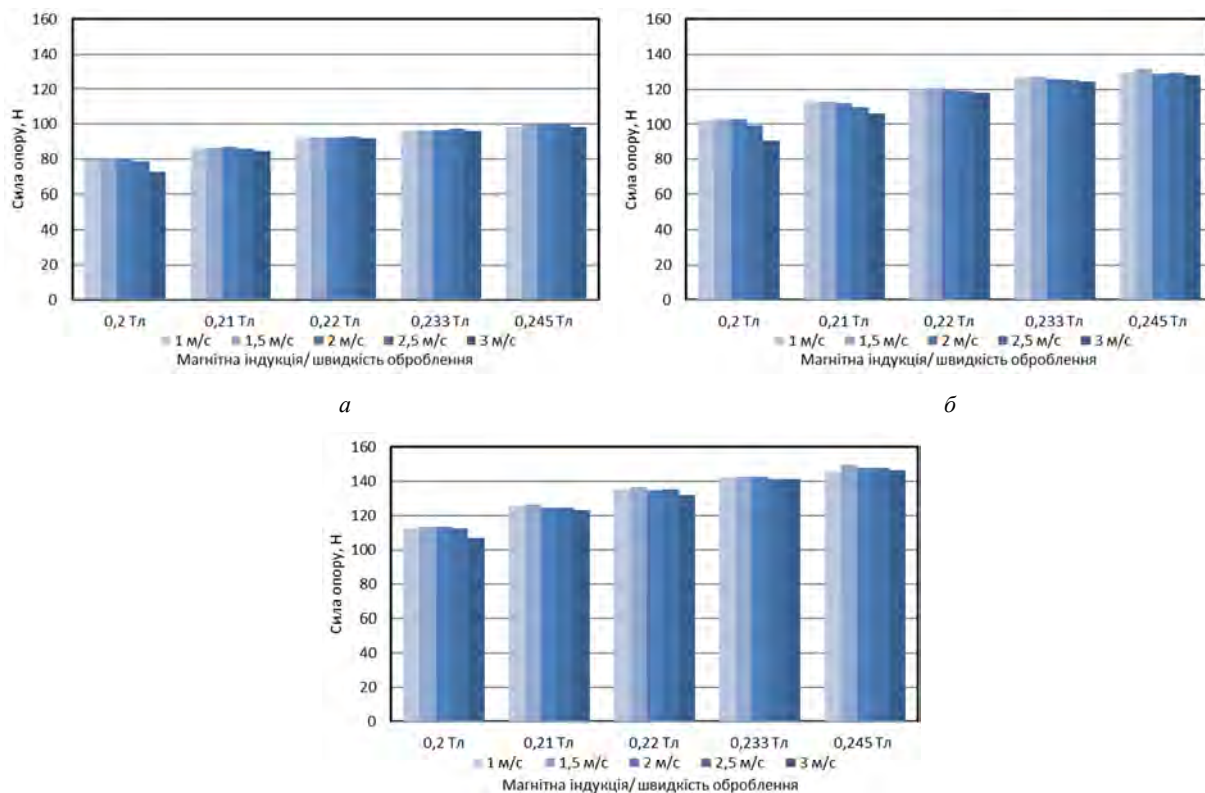


Рис. 3. Діаграми залежностей сили опору для зразків з Титану ВТ8: а) – діаметр 8 мм, б) – 12 мм, в) – 16 мм при обробленні порошком Полімам-Т з зернистістю 400/315 мкм

Таблиця 2. Відсоткове відношення приросту сили опору до приросту діаметру деталі з титану BT8

Діаметр, мм	Очікуване відношення, %	Реальне відношення усереднене, %	Реальне відношення мін-макс, %	Реальне відношення усереднене, %	Реальне відношення мін-макс, %
Поліам-М		200/100		400/315	
12	150	125	121–128	121	117–123
16	200	147	141–154	138	133–142
Поліам-Т		200/100		400/315	
12	150	116	112–120	129	124–132
16	200	142	134–151	145	140–149

Для того, щоб пояснити характер явища непропорційності зміни величини сили до зміни розміру оброблюваної деталі, необхідно розглянути “будову” МАІ. В роботах [1, 3, 8] показано, що магнітно-абразивний порошок в процесі MAO формується в МАІ у вигляді двох квазістабільних “структурних” утворень: конусоподібних стовпчиків, що потовщеною частиною “закріплені” на магнітних полюсних наконечниках магнітної системи - 1 (рис. 4) та веретеноподібних утворень, що розташовуються між конусоподібними стовпчиками - 2 (рис. 4). Висота цих стовпчиків (для зазору 35 мм) сягає 11.5–12 мм а максимальна ширина 3–3,3 мм. Веретеноподібні формування розташовуються у просторах між стовпчиками. В результаті зазначеного, враховуючи різну величину діаметрів оброблюваних деталей, вони взаємодіють з МАІ різними шляхами. Деталі діаметром 8 мм не мають прямої взаємодії з конусоподібними утвореннями (рис. 4 а), а їх оброблення відбувається шляхом безпосередньої взаємодії з веретеноподібними утвореннями за рахунок дії сил динамічного походження. Натомість деталі діаметром 12 (рис. 4. б) мм і, в більшій мірі, 16 мм (рис. 4 в) – взаємодіють з конусоподібними утвореннями. Умови взаємодії поверхні деталей з різними структурними утвореннями в МАІ відрізняються.

Вважається [1, 3, 8] що квазістабільні конусоподібні утворення при контакті з оброблюваною деталлю відхиляються від положення рівноваги, а після проходження деталі, ці утворення повертаються в попереднє положення. Це створює коливальні рухи МАІ, що мо-

жуть створювати додаткові явища в процесі оброблення і потребують подальших досліджень. Натомість, взаємодія з веретеноподібними формуваннями при MAO деталей малих діаметрів має інший характер, а саме, ці утворення не закріплені та можуть перемішуватися та переорієнтовуватися в робочій зоні [3]. У веретеноподібних утвореннях під час інтенсивного руху можуть виникати додаткові процеси та явища електромагнітної природи, такі як пондеромоторні сили. Стохастичність таких процесів зумовлює непередбачуваність результатів дослідження, та, можливо, впливає на непропорційність зміни величини сили до зміни розміру оброблюваної деталі.

Також причиною непропорційності зміни величини сили до зміни розміру оброблюваної деталі можуть бути процеси, пов’язані з витіснення порошку за межі робочої зони внаслідок великих розмірів деталі. Що, в свою чергу, зменшує тиск порошку через меншу кількість порошку, що приймає участь в обробленні.

Ймовірно, порошок що був витіснений за межі зони оброблення може бути причиною утворення ще більшого розрідження. Це розрідження призводить до того, що з наступним обертом деталі по кільцевій ванні необхідно менше зусилля для цього руху. Після розрідження порошок за рахунок дії магнітних сил повертається назад у зону оброблення, і тому швидкість цього відновлення може на пряму визначатися розміром оброблюваної деталі. Характер поведінки МАІ в зоні за деталлю, частково наведено у роботах [1, 8] (рис. 5).

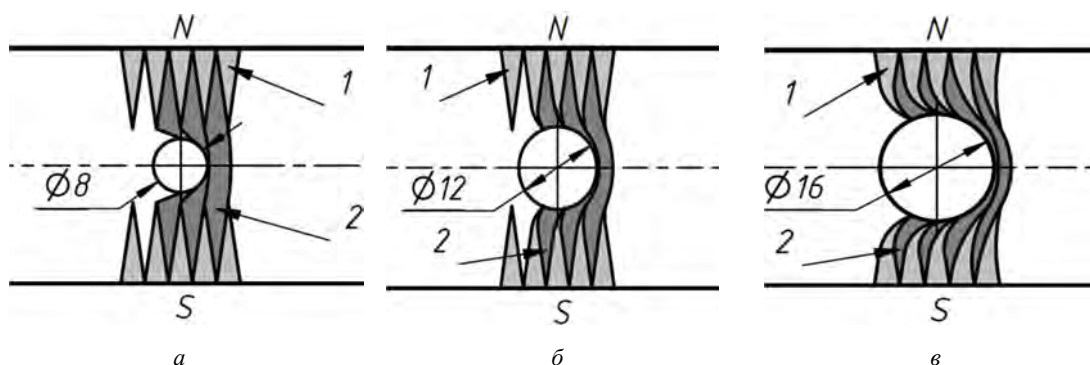


Рис. 4. Характер взаємодії деталей різних розмірів з утвореннями в МАІ

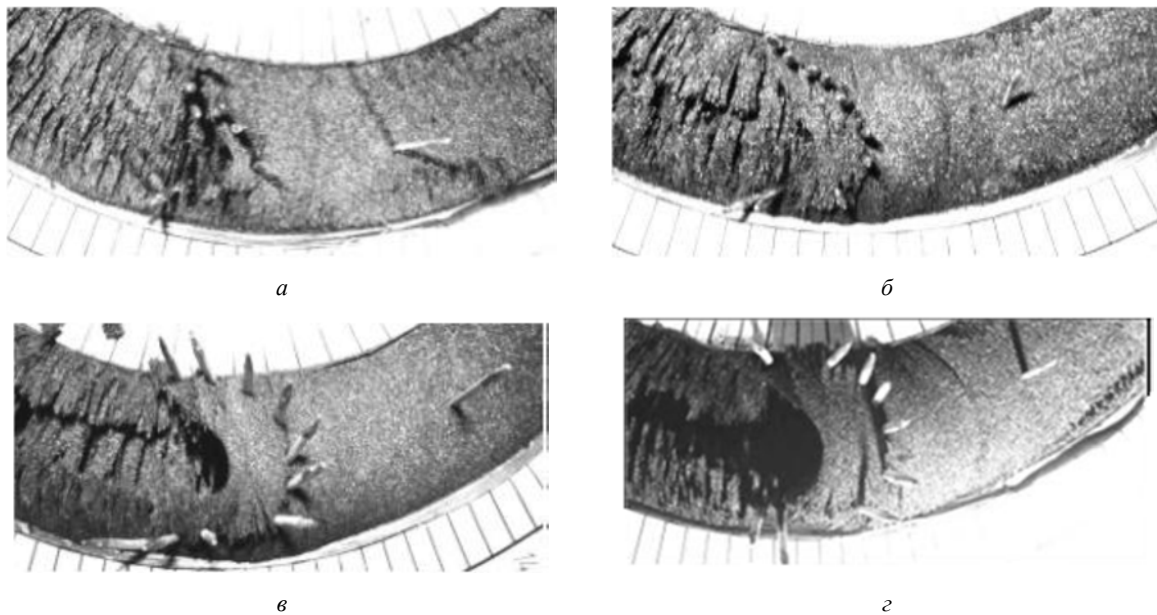


Рис. 5. Структура МАІ в результаті проходження деталі різних діаметрів, *a* – 4 мм, *б* – 8 мм, *в* – 16 мм, *г* – 20 мм [1, 8]

На фотографіях робочої зони показано, що деталі більших розмірів, після проходження у середовищі МАІ, залишають за собою зони, що не достатньо заповнені порошком. Натомість, цей порошок знаходиться за межами робочої зони і, відповідно, не приймає безпосередньої участі в обробленні. Це може підтверджувати ідею про розрідження зони оброблення деталлю великого розміру. Також, це явище має прямий зв'язок зі швидкістю відновлення МАІ. Проте, питання розрідження робочої зони та пов'язане з ним питання швидкостей відновлення МАІ не достатньо вивчені і потребують подальших досліджень.

Ці явища, очевидно, не переважають вплив збільшення сили від збільшення діаметру, але суттєво змінюють пропорції цього впливу. Вони характерні щонайменше для деталей з немагнітного матеріалу. Дослідження при обробленні деталей з феромагнітної сталі 40Х13 (табл. 3) показали дещо відмінні результати. Феромагнітні властивості сталі суттєво впливають а вищезазначені особливості процесу оброблення,

оскільки значення параметру зміни діаметру не стабільні і змінюються від зміни типу магнітно абразивного порошку та його зернистості.

Параметр зміни діаметру збільшується при зменшенні розміру частинок порошку. Що пояснюється більш щільним групуванням порошку біля поверхонь деталі, і власне чим більша поверхня деталі, тим більше ущільненого порошку взаємодіють з деталлю, збільшуючи цим силові навантаження. Такий самий ефект створює і тип порошку, порошок округлої форми Полімам-М схильний до більшого ущільнення ніж порошок осколької форми Полімам-Т.

Порівняння значень сил при обробленні сталі та титану показує такі результати: для деталей діаметром 16 мм, сила при обробленні сталі на 120–130% більша ніж при обробленні титану. Для деталей діаметром 12 мм – сили практично однакові (рис. 1), для деталей діаметром 8 мм сила при обробленні сталі складає 80–90% від сили при обробленні титану, що є досить неочікуваним результатом. Зазначений вище характер

Таблиця 3. Відсоткове відношення приросту сили лобового опору до приросту діаметру деталі зі сталі 40Х13

Діаметр, мм	Очікуване відношення, %	Реальне відношення усереднене, %	Реальне відношення мін-макс, %	Реальне відношення усереднене, %	Реальне відношення мін-макс, %
Полімам-М		200/100		400/315	
12	150	168	160–178	141	138–147
16	200	261	245–276	197	191–203
Полімам-Т		200/100		400/315	
12	150	138	126–152	127	125–134
16	200	201	182–224	179	163–217

взаємодії може пояснювати такі малі значення сили опору при обробленні сталевих зразків малого діаметру по відношенню до титанових зразків. Тобто, при великих діаметрах (16 мм) деталь взаємодіє зі “стійкими” стовпчикоподібними утвореннями МАІ та магнітні властивості сталі стимулюють підвищення сил тертя між цими утвореннями та поверхнею деталі. Проте, під час оброблення деталей малих діаметрів (8 мм), магнітна взаємодія сталевих деталей з веретеноподібними утвореннями, вірогідно, створює псевдорозрідження МАІ в робочій зоні.

Можливо таке явище пов'язано з переформатуванням структурних утворень МАІ, що інтенсифікують вплив пондеромоторних сил що, в свою чергу, сприяє псевдорозрідженню МАІ. На рис. 6 зображено ймовірний процес переформування структурних утворень при русі деталі 1 через стовпчикові утворення 2 та веретеноподібні утворення 3. На рис. 6 а – показано початковий момент під час якого деталь (зі сталі діаметром 8 мм) починає взаємодіяти з веретеноподібним утворенням. Далі на рис. 6 б – відбувається його деформування та зміщення. На рис. 6 в – зображено процес ймовірного розриву веретеноподібного формування на “уламки” 4. Це зумовлене заклинюванням веретеноподібних утворень 3 між деталлю та стовпчикоподібними утвореннями 2. Вважається, що паразитний вихровий струм, який протікає в представницьких об'ємах порошку, які в свою чергу формують веретено- і стовпчикоподібні утворення в МАІ, призводить до появи пондеромоторних сил та утворення локальних магнітних мікрополів [3, 11], які можуть або збільшувати, або зменшувати величину сил локальної магнітної взаємодії в зоні біля поверхні деталі. Можна припустити, що роз'єднання одного веретеноподібного утворення на декілька може створювати складну систему мікрополів, що у взаємодії з феромагнітною деталлю створює псевдорозрідження середовища МАІ. Натомість такий самий процес при обробленні парамагнітної деталі малого діаметру не викликає псевдорозрідження МАІ через відсутність магнітної взаємодії з матеріалом деталі.

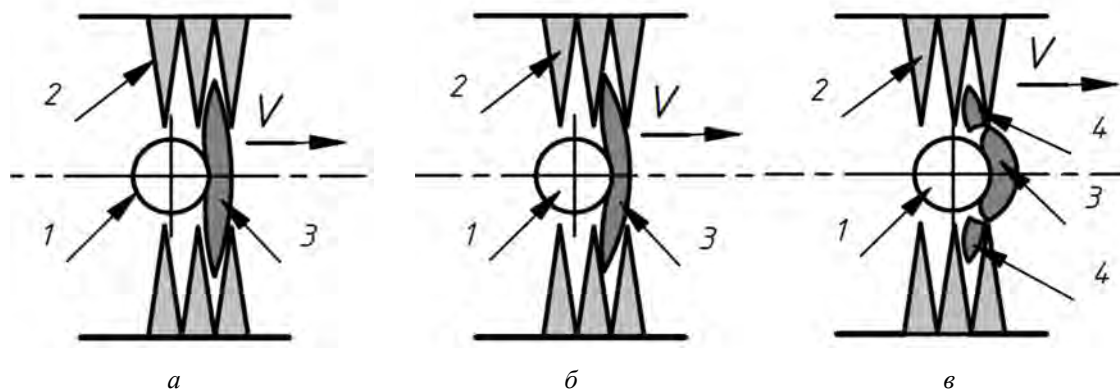


Рис. 6. Ймовірне переформування веретеноподібних утворень при обробленні деталей малого діаметру (8 мм)

Наведені припущення потребують певного уточнення і подальших досліджень.

Для подальшого порівняння результатів експериментальних досліджень, отриманих на зразках різних діаметрів, було визначено питомий тиск на поверхню. Одна з результуючих гістограм зображена на рис. 7.

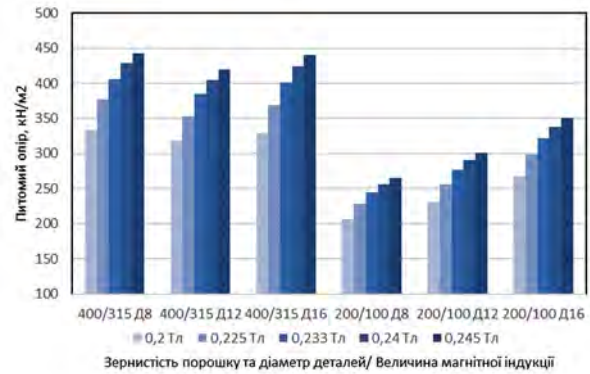


Рис. 7. Значення питомого тиску при обробленні Сталі 40Х13 порошком Полімам-М

Показано, що питомий опір при обробленні феромагнітної сталі, загалом, не залежить від діаметру деталі, а при обробленні парамагнітного сплаву титану питомий опір зменшується при збільшенні діаметру оброблюваної деталі. Тобто, при обробленні деталі з парамагнітного матеріалу, розміри оброблюваної деталі можуть опосередковано впливати на силові характеристики через процеси переформатування, що відбуваються в самому МАІ. Для деталі з феромагнітного матеріалу суттєвий вплив має магнітна взаємодія між порошком і деталлю, що превалює над впливом процесів переформування МАІ.

Практично у всіх дослідженнях (як при обробленні титану, так і сталі) спостерігається значна відмінність між впливом індукції та швидкості на величину питомого тиску. Має місце значно більший вплив індукції магнітного поля у порівнянні з несуттєвим впливом

швидкості оброблення. Проте, у більшості досліджень при малих значеннях індукції (0,2–0,22 Тл) існує відчутний вплив швидкості на величину питомого тиску (рис. 8). Це може вказувати на певний перерозподіл впливів факторів, тобто при достатньому зменшенні магнітних зв'язків між частинками порошку, ключова роль у взаємодії деталь-інструмент та формуванні тиску на оброблювану поверхню припадає саме на динамічні характеристики.

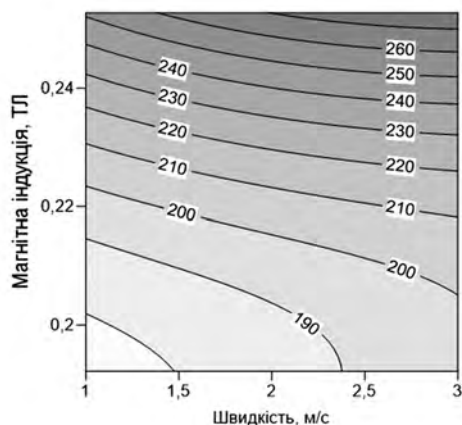
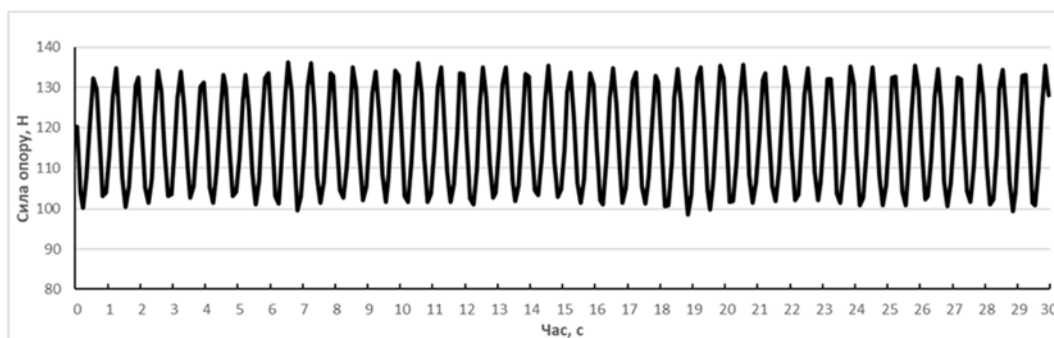


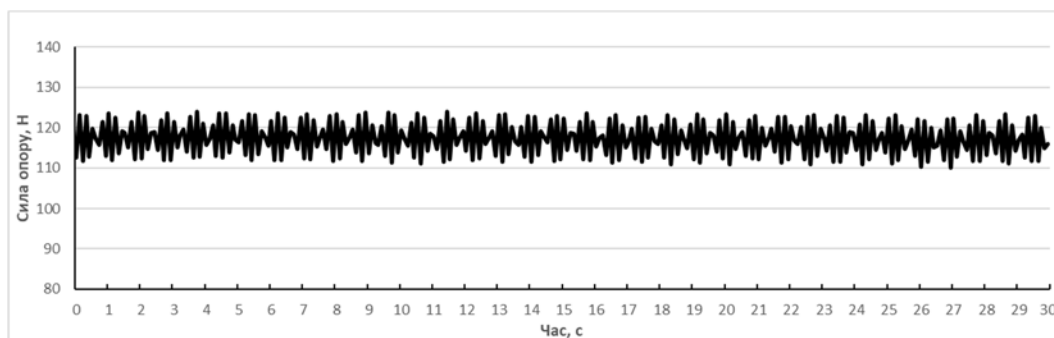
Рис. 8. Графік залежності питомого тиску від швидкості та індукції для зразку 12 мм з титану VT8 при обробленні порошком Полімам-Т 200-100 мкм

З огляду на те, що МАІ відносять до бінгамовських середовищ [3], особливістю яких є відмінна поведінка при різних значеннях напруження (а саме поведінку твердого пластичного тіла до точки зсуву, та утворення течії середовища після), це явище може пояснюватися режимом МАО відносно точки зсуву. Припустимо, що точка зсуву перебуває в прямій залежності до величини магнітної індукції (як параметру жорсткості середовища), тоді при малій індукції ця точка знаходиться в зоні дії відносно малих зусиль. Тому при малих значеннях індукції існує рух середовища схожий з законами руху рідини з прямим впливом швидкості на силу тиску. А при високих значеннях індукції, рух відбувається по іншим, відмінним законам.

Незважаючи на те що швидкість загалом не має визначного впливу на силу опору, проте має певний вплив на точність отриманих даних. Данні, отриманні з датчика у ході експерименту, представляють собою періодичні функції, що мають мінімальні та максимальні значення (рис. 9). Тобто, ці значення можуть, або вказувати на діапазон похибки при проведенні експерименту, або на явища, що відбуваються в процесі МАО. Цими явищами можуть бути оновлення порошку, перебудова структурних формувань МАІ та ін. [3, 7]. Визначено, що різниця максимальних та мінімальних значень зменшується при збільшенні швидкості (рис. 9), а також збільшується при збільшенні величини магнітної індукції.



а



б

Рис. 9. Зміна величини сил лобового опору в процесі МАО при обробленні деталі діаметром 12 мм зі сплаву VT8 за допомогою порошку Полімам-М 400/315мкм зі швидкістю а) – 1 м/с, б) – 3 м/с

Було проведено перерахування цієї різниці відносно середнього значення (що було прийняте раніше за реальне значення сили опору), внаслідок цього було знайдено, що різниця максимальних та мінімальних значень не залежить від деталі (а саме її розмірів та матеріалу) та магнітно абразивного порошку (його типу та зернистості). Залежність спостерігається тільки від швидкості руху деталі в середовищі МАІ. На рис. 10 наведено залежність від швидкості та магнітної індукції при дослідженні з використанням зразку з титану діаметром 12 мм та порошку Полімам-М 400/315 мкм, що фактично збігається з рештою досліджень. На малих швидкостях різниця максимальних і мінімальних значень сягає 30–35% від середнього значення сили опору, що може суттєво вплинути на точність дослідження, або вказати на невідомі до цього процесу та явища що виникають при МАО.

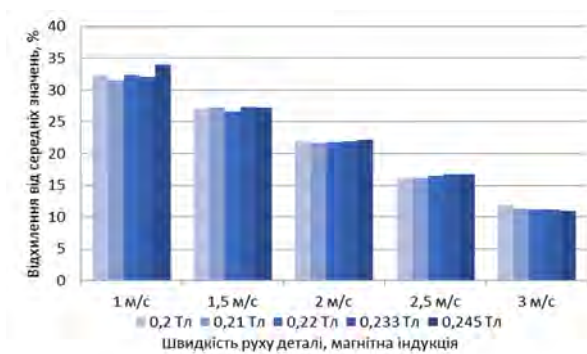


Рис. 10. Відсоткове відношення відхилення відносно середнього значення сили опору

Вищезазначені гістограми вказують на стабілізацію процесу МАО при збільшенні швидкості руху деталі в середовищі МАІ. В роботі [3] зазначено залежність числа Рейнольдса від швидкості руху в середовищі МАІ. Показано, що малі швидкості сприяють високим числам Рейнольдса, тобто створенню турбулентних режимів течії МАІ, що створюють нестабільності зокрема в величині сили опору [3, 8]. Зазначені вище особливості бінгамовського середовища також можуть зумовлювати такі результати. Тобто, перебування середовища у квазі твердому стані, при малих швидкостях оброблення, може створювати умови до неоднорідного оброблення та, як наслідок, коливань значення сили опору, пов'язаних з хвильовими процесами, описаними в [3]. Проте, з огляду на те, що показане явище може бути викликане не тільки особливостями процесу МАО, а і можливими похибками, що виникли в

процесі отримання результатів вимірювання, до них можна віднести наявність модуляції сигналу, що надходить з датчика і залежить від частоти, з якою здійснюється запис даних, необхідна заміна АЦП на перетворювач з суттєво більшою частотою зчитування даних з датчиків сили на вимірювальному пристосуванні та проведення додаткових досліджень з метою мінімізації і виключення похибок.

Висновки

Було проведено дослідження силових характеристик при магнітно абразивній обробці (МАО) циліндричних деталей різного діаметру (8, 12, та 16 мм) з пара та феромагнітного матеріалу. Дослідження проводились в кільцевій ванні діаметром 200 мм та з шириною 35 мм (в умовах великого магнітного зазору), діапазон швидкості оброблення складав 1–3 м/с, діапазон індукції магнітного поля – 0,2–0,24 Тл. Визначено прямий вплив величини магнітної індукції на значення сили опору, а саме збільшення сили опору при збільшенні величини магнітної індукції. Знайдено, що вплив швидкості руху деталі в середовищі МАІ має місце при малих значеннях магнітної індукції (0,2–0,22 Тл) через характер середовища МАІ як бінгамовського. Показано пряму залежність величини сили опору від розміру зерен магнітно-абразивного порошку (МАП). Також показано різницю в обробленні порошками Полімам-М та Полімам-Т (сила опору при обробленні порошком Полімам-М на 10–30% більша ніж при обробленні порошком Полімам-Т), зумовлену відмінними показниками намагніченості та внутрішнього тертя в парі МАІ-МАІ. Було визначено, що приріст сили опору зі зростанням діаметру не пропорційний зростанню діаметру (при збільшенні діаметра в 2 рази відбувається приріст сили опору в 1,5 рази). Роз'яснено вплив відмінності характеру оброблення різними структурними елементами МАІ на силу опору. Визначено, що при обробленні малих діаметрів (8 мм), феромагнітні властивості матеріалу деталі створюють псевдорозрідження, через яке значення сили опору при обробленні сталевого зразку нижче ніж при обробленні титанового на 10–20%. Розглянуто причини та наслідки періодичних коливань сили опору та вплив технологічних параметрів на величину цих коливань. Визначено, що подальші роботи мають включати детальніші дослідження коливань значень сили опору, швидкостей відновлення МАІ та процесів руху та переформування структурних формувань МАІ.

References

- [1] V. S. Mayboroda, I. V. Slobodyanyuk and D. Yu. Dzhuliy, *Maginitno-abrazivnaya obrabotka detaley slozhnoy formy*, Zhitomir: PP "Ruta", 2017. Available: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/27484>
- [2] L.M. Akulovych and L.E. Serheev, *Mahnitno-abrazivna obrobka slozhnoprofil'nykh poverkhon' detaley sil's'kohospodars'kykh mashy*, Mynsk: BHATU, 2019.

- [3] V.S. Maiboroda, “Osnovy stvorenniya i vykorystannya poroshkovoho mahnitno-abrazyvnoho instrumentu dlya finishnoyi obrobky fasonnykh poverkhon”, Dys. dokt.tekhn.nauk. Kyiv, 2001.
- [4] Yu.M. Baron, *Mahnitno-abrazyvna ta mahnitna obrobka vyrobiv ta rezhuchykh instrumentiv*, Lenynhrad: Mashynostroenyne, 1986.
- [5] D.K. Singh, V.K. Jain and V. Raghuram, “Experimental investigations into forces acting during a magnetic abrasive finishing process”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, No. 30, pp. 652–662, 2006. DOI: doi.org/10.1007/s00170-005-0118-6
- [6] V. Maiboroda, K. Zastavskiy and R. Zhuk, “Characteristics of the interaction between magnetic-abrasive tool and a processed surface in a circular work zone”, *Technical Engineering*, No. 2(88), pp. 3–13, 2021. DOI: doi.org/10.26642/ten-2021-2(88)-3-13
- [7] V. S. Maiboroda *et al.*, “Doslidzhennia syl lobovoho oporu, shcho vynykaiut v mahnitno-abrazyvnomu instrumenti pry obroblenni tsylindrychnykh detalei v kiltsevii vann”, *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry*, No. 2(6), pp. 16–22, 2022. DOI: 10.20998/2079-004X.2022.2(6).03
- [8] I.V. Tkachuk, “Formuvannya mahnitno-abrazyvnoho instrumentu zi stabil'nymy vlastyvostyamy v robochykh zazorakh kil'tsevooho typu”, Ph.D. dissertation: 05.03.01. Kyiv, 2015.
- [9] D. V. Targan, V. S. Maiboroda and D. Yu. Dzhulii, “Analiz intensivnosti magnitno-abrazivnogo obroblennya mitchikov v zalezhnosti vid kinematichnykh parametriv procesu”, *Visnik KrNU imeni Mikhajla Ostrogradskogo. Suchasni tekhnologii v mashinobuduvanni, transporti ta girmicztvi*, No. 106, pp. 82–88, 2017.
- [10] V.M. Heychuk, “Syntez kinematyky protsesu mahnitno-abrazyvnoyi obrobky v kil'kokh vannikh”, Avtoref Ph.D. dissertation, 05.03.01, 2012.
- [11] Yu. Dolinsky and T. Elperin, “Ponderomotive forces in liquid conductors with macroscopic solid inclusions”, *Journal of Applied Physics*, No. 76, pp. 4437–4439, 1994. <https://doi.org/10.1063/1.357341>

The influence of the size of details on the frontal resistance forces during magnetic abrasive finishing

K.O. Zastavskiy, V.S. Maiboroda

Abstract. *The magnetic abrasive finishing process (MAF) is an effective method of finishing details. It is especially beneficial of processing important parts with complex shape, such as cutting tools, gas turbine blades, medical products, etc. MAF allows to affect the quality of the treated surface, surface hardness, microgeometry of cutting edges (for a cutting tool), removal of residual stresses in the material of the details. The relative newness of the method and, hence, little awareness of the processes and phenomena that occur during MAF limit the wide use of the method in production.*

Insufficient awareness of the nature of MAF, especially regarding the forces that arise during the interaction of the processed part and the environment of the magnetic abrasive tool (MAT). Available researches provide only basic information that is not sufficient for a comprehensive study of MAF. This is especially true for the effect of size of the detail on features of the implementation of the process. Conducting research on the processing of parts of various sizes and determining the forces and phenomena accompanying the MAF. To perform the aim, a device with a dynamometric sensor that allows to measure the frontal resistance was used. Ferromagnetic and paramagnetic material cylindrical details with different diameters (8, 12 and 16 mm) were used. Polymam-M and Polymam-T (grain size 400/315 μm , 200/100 μm) powders were used. The speed of movement varied in range 1–3 m/s, induction of magnetic field: 0.20–0.24 T.

It was established that for the specified processing conditions, the influence of the magnitude of the magnetic field induction prevails over the influence of the speed of movement of details. The effect of the size of the parts on the specifics of the MAO is shown, the nature of processing by individual structural formations of the MAO and the difference between them is determined. The question of fluctuations in the magnitude of the resistance force at MAO and the influence of movement speed on them is considered.

The influence of technological parameters on the frontal resistance force during processing of parts of different diameters and materials with different magnetic properties has been determined, and further directions for research have been determined.

Keywords: Magnetic Abrasive Finishing (MAF), Magnetic Abrasive Tool (MAT), MAF in a large magnetic gap, resistance force.