

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ЗАСТАВСЬКИЙ КОСТЯНТИН ОЛЕГОВИЧ

УДК 621.923

ДИСЕРТАЦІЯ
ФОРМУВАННЯ ІНСТРУМЕНТАЛЬНОГО СЕРЕДОВИЩА ПРИ
МАГНІТНО АБРАЗИВНОМУ ОБРОБЛЕННІ В ВЕЛИКИХ МАГНІТНИХ
ЗАЗОРАХ

Спеціальність 131 – Прикладна механіка
Галузь знань 13 – Механічна інженерія

Подается на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ К.О. Заставський

Науковий керівник Майборода Віктор Станіславович,
доктор технічних наук, професор

Київ – 2024

АНОТАЦІЯ

Заставський К.О. Формування інструментального середовища при магнітно абразивному обробленні в великих магнітних зазорах. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 13 – Механічна інженерія за спеціальністю 131 – Прикладна механіка. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2024.

В дисертаційній роботі розроблено методики визначення сил, що діють на деталь з боку магнітного інструменту (МАІ), які дозволяють встановити особливості формування МАІ в процесі магнітно-абразивного оброблення (МАО). В перше встановлено реальну величину сил при МАО, а також визначено процеси та явища, що на них впливають з урахуванням зміни технологічних факторів, таких як індукція магнітного поля, швидкість рухів при обробленні, типу, форми та розміру частинок МАІ та матеріалу деталі. Розроблено рекомендації щодо інтенсифікації процесу МАО з огляду на особливості формування МАІ та реальну величину сил.

Експеримент виконували на установці для МАО виготовленій на базі вертикально фрезерного верстату типу ОЦ – Іжевськ, що забезпечує оброблення деталей у великому магнітному зазорі кільцевого типу.

Зразками для проведення дослідження були циліндричні квадратні та трикутні призми висотою 30 мм і характерним розміром 8, 12 та 16 мм з феро-пара- та діамагнітних матеріалів, а також лопатка ГТД товщиною 1 мм та висотою 30 мм зі сплаву титану.

Для вимірювання сил при МАО було використано методики вимірювання ефективного крутного моменту на валу двигуна, що обертає деталь, та вимірювання сили опору за допомогою тензодатчика. Розроблено відповідне обладнання, що дозволило виконувати дослідження з врахуванням необхідних

факторів. Для формування МАІ використовували порошки: осколючастий Полімам-Т з розміром зерен 200/100 мкм, 400/315 мкм, та округлий Полімам-М 200/100 мкм, 400/315 мкм.

Для визначення інтенсивності оброблення було використано квадратні призматичні зразки висотою 5 мм та розміром сторони 8, 12 та 20 мм. Параметром інтенсивності у цьому дослідженні виступав радіус заокруглення кромek деталі, що вимірювався за допомогою профілометра.

Встановлено, що ефективний момент тертя при обробленні феромагнітної деталі (при даних зразках та технологічних умовах) становить до 1,4 Нм, при обробленні немагнітних деталей – до 0,9 Нм. Показано, що ефективний момент тертя прямо залежить від величини магнітної індукції, швидкостей руху деталі в робочій зоні та навколо своєї осі. Встановлено області МАО при яких відбувається: формування квазістабільного МАІ (при швидкості обертання навколо власної осі 0 – 10 рад/с), область стійкого МАІ (10 – 65 рад/с) та область з аномальним ростом/падінням сил тертя (більше 65 рад/с).

Показано, відмінності в характері взаємодії між МАП та деталлю при використанні порошків з округлої форми, що спричиняє переважно пластичне деформування поверхневого шару оброблюваної поверхні.

Визначено, що сила опору при обробленні циліндричних деталей має лінійну залежність від величини магнітної індукції та становить 720 Н/Тл для порошку з зернистістю 200/100 мкм та 960 Н/Тл для 400/315 мкм. Показано, що сила опору при обробленні немагнітних матеріалів Д16Т, ВТ8, БрОц не має суттєвих відмінностей. Встановлено, що сили лобового опору при МАО феромагнітних зразків як і для немагнітних зразків не залежать від швидкості оброблення і змінюються в діапазоні від 160 до 220 Н, це в 1,2-1,5 разів вище, ніж для немагнітних деталей (80 – 180 Н).

Роз'яснено відмінність сили опору при обробленні магнітних та немагнітних деталей за рахунок особливостей взаємодії структурних елементів МАІ з оброблюваними поверхнями та формуванням зон заклинювання

порошку. Зростання зернистості порошку з 200/100 до 400/315 мкм спричиняє зростання сили опору в 1,2 – 1,3 рази.

За результатами аналітичного представлення функцій зміни величин питомих сил тертя і сил лобового опору розраховано співвідношення між питомими силами тертя і опору $-F_{\text{тер}}/F_{\text{оп}} = \eta$ – параметр коефіцієнту тертя при МАО. За характером зміни величини η встановлено, що зі збільшенням швидкості руху деталей навколо осі кільцевої ванни, переважно, має місце монотонне зменшення параметру коефіцієнту тертя. Зростання швидкості обертання деталей навколо власної осі призводить в досліджуваному діапазоні практично до пропорційного збільшення величини η .

В перше визначено, що при обробленні парамагнітних деталей приріст сили опору зі зростанням діаметру не пропорційний зростанню діаметру (при збільшенні діаметра в 2 рази відбувається приріст сили опору в 1,5 рази), що пояснюється відмінностями характеру оброблення різними структурними елементами МАІ. Натомість, оброблення феромагнітних деталей характеризується пропорційним приростом сили опору від зростання розміру деталей.

Підтверджено, що середовище МАІ можна віднести до типу бінгамівського через характер впливу швидкості на процес оброблення, особливо при малих значеннях магнітної індукції (0,2 – 0,22 Тл). Тобто МАІ має ознаки «квазірідкого» середовища при малих значеннях магнітної індукції (малій жорсткості) та «квазітвердого» - при великих значеннях індукції (більше 0,22 Тл).

Визначено, що при обробленні малих діаметрів (8 мм), феромагнітні властивості матеріалу деталі створюють умови для псевдо розрідження магнітно-абразивного середовища, через яке значення сили опору при обробленні сталевих зразків нижче ніж при обробленні титанового на 10 – 20%. Натомість при обробленні деталей великого розміру сила опору сталевих деталей була на 10 – 30 % більшою ніж для титанової деталі через значний вплив магнітних властивостей деталі при її взаємодії з формоутвореннями МАІ.

Встановлено, що співвідношення питомого опору, що має місце між деталями різної форми і МАІ (відносно площі безпосередньо оброблюваної поверхні) може бути описане коефіцієнтом форми деталі. Де найбільший коефіцієнт відповідає деталі з квадратним перерізом, а найменший – у вигляді циліндру. Визначено, що при обробленні феромагнітних деталей великого розміру (16 мм) присутнє явище розширення мертвої зони з МАІ, яка формується на магнітних наконечниках, що суттєво (від 20 до 70 %) підвищує силу опору. Явище зумовлене магнітною взаємодією між деталлю та МАІ при безпосередній близькості полюсних наконечників до поверхонь деталі. Запропоновано схему взаємодії МАІ з феро- та парамагнітними деталями, що враховує напрямок переміщення МАІ в робочій зоні зумовлений силами магнітного притягнення.

Підтверджено, що при обробленні тонких деталей типу лопатки ГТД на великих швидкостях оброблення 3 – 3,5 м/с виникає явище розриву веретеноподібного утворення МАІ, що супроводжується різким (до 25%) зниженням сили опору (це явище є характерним тільки для відносно тонких деталей та відносно крупного порошку).

Розглянуто явище періодичних коливань сили опору та вплив технологічних параметрів на величину цих коливань. Визначено, що періодичні коливання залежать від швидкості оброблення, тобто збільшенні швидкості оброблення з 1 до 3,5 м/с відбувається зменшення коливань з 40% до 15% відносно середнього значення сили опору.

Визначено, що наближення оброблюваних поверхонь феромагнітних деталей до робочих поверхонь полюсних наконечників не тільки підвищує величину сили опору на 20 – 70 %, але й інтенсифікує процес різання на 20 – 30%. Це відбувається через взаємодію оброблюваних поверхонь деталі з ущільненими формуваннями МАІ (такі як «мертва» зона та конусоподібні формоутворення). З огляду на це було запропоновано враховувати наявність ущільнених зон МАІ при розробці технологічних процесів МАО.

Робота дозволила вперше дослідити вплив реологічних властивостей МАІ в умовах великого магнітного зазору на процеси силової взаємодії, що відбуваються між МАІ і реальною деталлю при МАО з урахуванням характеристик оброблюваної деталі та магнітно-абразивних порошків.

В ході роботи було експериментально підтверджено теоретичні припущення, щодо впливу характеристик МАІ та технологічних факторів на силову взаємодію деталі з МАІ при МАО у великих магнітних зазорах. Визначено зв'язок сил, що виникають між оброблюваною деталлю та МАІ та процесами видалення матеріалу при МАО.

Результати роботи дозволили уточнити механізм формування МАІ і особливості його взаємодії з поверхнями деталей складної форми в умовах великих магнітних зазорів кільцевого типу, що зробило можливим розширення можливостей методу МАО і підвищення його ефективності і продуктивності.

Ключові слова: магнітно-абразивне оброблення (МАО), магнітно-абразивний порошок (МАП), магнітно-абразивний інструмент (МАІ), гібридний інструмент, різальний інструмент, різання, сила різання, режими різання, швидкість різання, технологічний процес, технологічна система, інноваційний процес, МАО в великому магнітному зазорі, магнітне поле, сила опору, тертя, коефіцієнт тертя, МАО пара- та феромагнітних деталей, шорсткість, деформація, пластичне деформування.

ABSTRACT

Kostiantyn Zastavskiy Forming of the tool environment during magnetic abrasive processing in large magnetic gaps. Qualification scientific manuscript copyright.

Thesis for the scientific degree of the doctor of philosophy, the field of study 13 – Mechanical engineering, program subject area 131 – Applied mechanics. National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, 2024.

In the dissertation work, a methodology for determining the forces acting on the part from the side of the magnetic tool (MAI) was developed, which allows establishing the features of the formation of the MAI in the process of magnetic abrasive processing (MAF). For the first time, the real magnitude of the force at MAF was determined, as well as the processes and manifestations that affect them in view of changes in technological factors, such as magnetic field induction, speed of movements during processing, type, shape and size of MAP particles and material of details. Recommendations on the intensification of the MAF process have been developed, taking into account the features of the formation of the MAI and the real magnitude of the force.

The experiment was carried out on a machine for MAF, manufactured on the basis of a vertical milling machine of the OC-Izhevsk type, which ensures the processing of parts in a large ring-type magnetic gap.

The samples for the study were cylindrical square and triangular prisms with a height of 30 mm and a characteristic size of 8, 12, and 16 mm made of ferro-para- and diamagnetic materials, and a 1 mm-thick and 30-mm-high turbine blade made of a titanium alloy.

The technique of measuring the effective torque on the shaft of the motor rotating the part and measuring the resistance force using a strain gauge was used to measure the force at MAF. Appropriate equipment was designed, which made it possible to taking into account the most required factors in this study. The ferromagnetic powders were used for the formation of MAI: fragmented Polymam-T with a grain size of 200/100 μm , 400/315 μm , and rounded Polymam-M 200/100 μm , 400/315 μm .

To determine the processing intensity, square prismatic samples with a height of 5 mm and a side size of 8, 12 and 20 mm were used. The intensity parameter in this study was the radius of rounding of the edges of the detail, which was measured using a profilometer.

It was established that the effective moment of friction when processing a ferromagnetic detail (according to sample data and technological conditions) is up to 1.4 Nm, when processing non-magnetic details - up to 0.9 Nm. It is shown that the effective moment of friction directly depends on the magnitude of magnetic induction, the speed of movement of parts in the working area and around its axis. The region of MAO in which the following occurs: the formation of quasi-stable MAI (at a rotation speed around its own axis of 0-10 rad/s), the region of stable MAI (10-65 rad/s) and the region with anomalous growth/decrease of the friction force (more than 65 rad/s).

It is shown that there are differences in the nature of the interaction between the MAP and the detail when using powders of a rounded shape, which causes mainly plastic deformation of the surface layer of the finished surface.

It was determined that the resistance force during processing of cylindrical parts has a linear dependence on the magnitude of the magnetic induction and is 720 N/T for powder with a grain size of 200/100 μm and 960 N/T – for 400/315 μm . It is shown that the strength of resistance during processing of non-magnetic materials (aluminum, titanium and bronze) has no significant differences. It was established that the frontal resistance forces at MAF of ferromagnetic samples, as well as for non-magnetic samples, do not depend on the processing speed and vary in the range from 160 to 220 N, which is 1.2 – 1.5 times higher than for non-magnetic parts (80 - 180 N).

The difference in the strength of resistance for processed magnetic and non-magnetic parts is explained due to the peculiarities of the interaction of the structural elements of the MAI with the processed surfaces and the formation of the powder jamming zone. An increase in the grain size of the powder from 200/100 to 400/315 microns causes a 1.2-1.3 times increase in the resistance force.

According to the results of the analytical representation of the functions, the magnitude of the specific friction forces and the frontal resistance force changes, the ratio between the specific friction forces and resistance is calculated $-F_{fr}/F_{res} = \eta$ – the parameter of the friction coefficient during MAF. According to the nature of the

change in the value of η , it was found that with an increase in the speed of movement of details around the axis of the ring bath, there is mainly a monotonous decrease in the parameter of the coefficient of friction. The increase in the speed of rotation of details around their own axis in the studied space is practically proportional to the increase in the value of η .

For the first time, it was determined that during processing of paramagnetic parts, the increase in resistance with increasing diameter is not proportional to the increase in diameter (with a 2-fold increase in diameter, there is a 1.5-fold increase in resistance), which is explained by the differences in the nature of processing and improvement by structural elements of the MAI. On the other hand, the processing of ferromagnetic parts is characterized by a proportional increase in the resistance force due to the increase in the size of the part.

It is confirmed that the environment of the MAI can be attributed to the type of Bingham character due to the influence of the speed of the processing process, especially at low values of magnetic induction (0.2 - 0.22 T). That is, the MAI has the characteristics of a "quasi-liquid" medium at low values of magnetic induction (low stiffness) and "quasi-solid" at high values of induction (more than 0.22 T).

It was determined that when processing small diameters (8 mm), the ferromagnetic properties of the material of the part create conditions for pseudo-liquefaction of the magnetic-abrasive medium, due to which the value of the force resistance during processing of the steel sample is lower than during processing.

Key words: Magnetic Abrasive Finishing (MAF), Magnetic Abrasive Powder (MAP), Magnetic Abrasive Tool (MAT), hybrid tool, cutting tool, cutting, cutting force, cutting conditions, cutting speed, technological process, technological system, process innovation, MAF in a large magnetic gap, magnetic field, resistance force, friction, coefficient of friction, MAF on para- and ferromagnetic details, roughness, deformation, plastic deformation.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

1. Особливості взаємодії магнітно-абразивного інструменту з оброблюваною поверхнею в умовах кільцевої ванни /В.С.Майборода, К.О.Заставський, Р.Б.Жук. Технічна інженерія, (2(88), 3–13.
[https://doi.org/10.26642/ten-2021-2\(88\)-3-13](https://doi.org/10.26642/ten-2021-2(88)-3-13) (Здобувачем виконано експериментальну роботу та аналіз сил тертя)
2. Дослідження сил лобового опору, що виникають в магнітно–абразивному інструменті при обробленні циліндричних деталей в кільцевій ванні / Майборода В. С., Джулій Д. Ю., Бесарабець Ю. Й., Слободянюк І. В., Заставський К. О. № 2 (2022): Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні [https://doi.org/10.20998/2079-004X.2022.2\(6\).03](https://doi.org/10.20998/2079-004X.2022.2(6).03) (Здобувачем виконано експериментальну роботу та аналіз сил опору)
3. Вплив розміру деталей на сили лобового опору при магнітно-абразивному обробленні / Заставський К. О., Майборода В. С. Mechanics and Advanced Technologies. – 2022. – No. 2. – С. 168-177.
<https://doi.org/10.20535/2521-1943.2022.6.2.264410> (Здобувачем виконано експериментальну роботу та аналіз впливу факторів оброблення на силу опору та процес формування МАІ)
4. Analysis of the forces acting from the side of the magneto-abrasive tool on parts being machined during magneto-abrasive machining in conditions of the annular bath with large working gaps / Майборода В. С., Джулій Д. Ю., Заставський К. О. Mechanics and Advanced Technologies, 7(1), 61–67.
<https://doi.org/10.20535/2521-1943.2023.7.1.271548> (Здобувачем виконано експериментальну роботу)
5. Дослідження сил опору з боку порошкового середовища на рух деталей при магнітно-абразивному обробленні в кільцевій ванні / Майборода В. С., Джулій Д. Ю., Заставський К. О. № 2(8) (2023): Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні
[https://doi.org/10.20998/2079-004X.2023.2\(8\).16](https://doi.org/10.20998/2079-004X.2023.2(8).16) (Здобувачем виконано експериментальну роботу та аналіз сил опору та процес формування МАІ)

експериментальну роботу та аналіз впливу факторів оброблення на силу опору та процес формування МАІ)

6. Вплив форми оброблюваної деталі на сили опору при магнітно-абразивному обробленні / Заставський К. О., Майборода В. С. Технічна інженерія. 2(92) (Лис 2023), 31–38. DOI:[https://doi.org/10.26642/ten-2023-2\(92\)-31-38](https://doi.org/10.26642/ten-2023-2(92)-31-38). *(Здобувачем виконано експериментальну роботу та аналіз впливу факторів оброблення на силу опору та процес формування МАІ)*

Роботи апробаційного характеру:

7. Визначення динамічних навантажень при МАО в робочій зоні кільцевого типу в умовах великих магнітних зазорів / Заставський К. О., Майборода В. С., Слободянюк І. В. Інновації молоді в машинобудуванні: Збірка праць Міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених та студентів / за заг. ред. Данильченка Ю.М., д-ра техн. наук., проф. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – № 1. – 443 с. *(Здобувачем виконано експериментальну роботу та аналіз динамічних навантажень)*

8. Особливості взаємодії магнітно-абразивного інструменту з оброблюваною поверхнею в умовах кільцевої ванни / Заставський К.О., Майборода В.С. Збірник наукових праць X Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю «Процеси механічної обробки, верстати та інструмент», 6–9 листопада 2019 року.– Житомир : Державний університет «Житомирська політехніка», 2019. – 211 с. *(Здобувачем виконано експериментальну роботу та аналіз взаємодії МАІ та деталі)*

9. Вплив індукції магнітного поля на ефективний момент при магнітно-абразивному обробленні в кільцевій ванні в умовах великих магнітних зазорів / Майборода В.С., Заставський К.О., Жук Р.Б. Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво : матеріали XIX Міжнародної науково-практичної конференції (м. Суми, 25–26 листопада 2020 року) / редкол.: В. О. Залого, О. В. Івченко. – Суми : Сумський державний університет, 2020. – 183 с. *(Здобувачем виконано експериментальну роботу та аналіз сил тертя)*

10. Визначення нормальних сил при магнітно абразивному обробленні в умовах великих магнітних зазорів / Заставський К. О., Джулій Д. Ю., Майборода В. С. Інновації молоді в машинобудуванні (Youth Innovations in Mechanical Engineering): Збірка праць Міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених та студентів / за заг. ред. Данильченка Ю.М., д-ра техн. наук., проф. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – № 3. – 460 с. *(Здобувачем виконано експериментальну роботу та аналіз сил опору)*

11. Сили опору магнітно–абразивного інструменту при магнітно–абразивному обробленні циліндричних виробів в кільцевій ванні / Джулій Д. Ю., Заставський К. О., Майборода В. С., Слободянюк І. В. Збірник наукових праць XI Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю «Процеси механічної обробки, верстати та інструмент», 5–6 листопада 2021 року. – Житомир : Державний університет «Житомирська політехніка», 2021. – 191 с. *(Здобувачем виконано експериментальну роботу та аналіз сил опору)*

12. Вплив форми оброблюваної деталі на сили опору при магнітно-абразивному обробленні / Заставський К.О., Майборода В.С. Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2023) : матеріали тез доповідей XIII Міжнародної науково-практичної конференції (м. Чернігів, 25–26 травня 2023 р.) : у 2 т. / Національний університет «Чернігівська політехніка» [та ін.] ; відп. за вип.: Єрошенко Андрій Михайлович [та ін.]. – Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2023. – Т. 1. – 366 с. *(Здобувачем виконано експериментальну роботу та аналіз впливу факторів оброблення на силу опору та процес формування МАІ).*

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ НА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	16
ВСТУП.....	17
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ЯВИЩ, ЩО СУПРОВОДЖУЮТЬ ПРОЦЕС ФОРМУВАННЯ ІНСТРУМЕНТАЛЬНОГО СЕРЕДОВИЩА ПРИ МАГНІТНО АБРАЗИВНОМУ ОБРОБЛЕННІ	22
1.1 Процес МАО та його особливості.....	22
1.2 Аналіз факторів що впливають на формування МАІ та сили, що діють при МАО	23
1.2.1 Складові магнітно-абразивного інструменту та їх особливості.....	25
1.2.2 Особливості впливу характеристик деталі на формування МАІ.....	33
1.2.3 Додаткові фактори, що мають вплив на формування МАІ та величину сил при взаємодії МАІ та деталі.....	34
1.3 Аналіз попередніх досліджень сил, що виникають при МАО.....	35
1.4 Висновки. Мета та задачі дослідження.....	41
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ОСОБЛИВОСТЕЙ ФОРМУВАННЯ МАГНІТНО-АБРАЗИВНОГО ІНСТРУМЕНТУ ПРИ МАО У ВЕЛИКИХ РОБОЧИХ ЗАЗОРАХ.....	45
2.1 Обладнання для проведення досліджень.....	45
2.2 Зразки для дослідження величини сил при МАО.....	47
2.3 Суть методів дослідження.....	49
2.3.1 Метод дослідження тангенціальної складової сил.....	49
2.3.2 Метод дослідження нормальної складової сил.....	51
2.3.3 Метод вимірювання локальної індукції магнітного поля..	52
2.3.4 Метод дослідження інтенсивності видалення матеріалу при МАО.....	53

2.4 Магнітно-абразивні порошки, що використовувалися в дослідженні для формування МАІ.....	54
2.5 Пристосування для забезпечення умов формування стабільного МАІ при МАО в кільцевій ванні.....	56
РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ТАНГЕНЦІАЛЬНОЇ ТА НОРМАЛЬНОЇ СКЛАДОВИХ СИЛ ПРИ МАО.....	57
3.1 Величина ефективного моменту тертя.....	57
3.1.1 Ефективний момент при обробленні феромагнітної деталі.....	57
3.1.2 Ефективний момент при обробленні пара- та діамагнітних деталей.....	60
3.1.3 Поверхня деталей при обробленні округлим порошком Полімам-М.....	64
3.2 Результати дослідження нормальної складової сил при МАО.....	65
3.2.1 Нормальна складова при обробленні немагнітних зразків	65
3.2.2 Нормальна складова при обробленні магнітних зразків....	67
3.3 Аналітичне визначення коефіцієнтів тертя.....	70
3.4 Висновки.....	73
РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РОЗМІРІВ ОБРОБЛЮВАНОЇ ДЕТАЛІ НА СИЛИ ПРИ МАО.....	75
4.1 Залежність сили опору зі сторони МАІ при МАО від розмірів деталей та технологічних умов.....	75
4.2 Залежність значень питомого опору зі сторони МАІ при МАО від розмірів деталей та технологічних умов.....	89
4.3 Опосередкований вплив швидкості оброблення на силу опору....	92
4.4 Дослідження залежності сили опору з боку МАІ при обробленні тонкої деталі типу лопатка ГТД.....	95
4.5 Висновки.....	100

РОЗДІЛ 5 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ФОРМИ ОБРОБЛЮВАНОЇ	
ДЕТАЛІ НА СИЛИ ПРИ МАО.....	102
5.1 Результати дослідження впливу форми оброблюваної деталі на силу опору.....	102
5.2 Питома сила опору при зміні форми оброблюваної деталі.....	111
5.3 Вплив розміру деталей на ефективність МАО в умовах кільцевої ванни.....	115
5.4 Висновки.....	119
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	120
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	123
ДОДАТОК А.....	132
ДОДАТОК Б.....	134

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

1. Скорочення

АЦП – аналого-цифровий перетворювач;

БНТП – багатогранна непереточувана твердосплавна пластина

ВСЕ – відновлювальний стержневий елемент;

ГТД – газо-турбінний двигун;

МАІ – магнітно-абразивний інструмент;

МАО – магнітно-абразивне оброблення;

МАП – магнітно-абразивний порошок;

ПАР – поверхнево-активна речовина

ПК – персональний комп'ютер

РІ – різальний інструмент

2. Умовні позначення

$V_{\text{кв}}$ – швидкість головного руху (лінійна швидкість руху деталі вздовж робочої зони), м/с;

V_0 – швидкість обертання деталі навколо власної осі, рад/с

$F_{\text{тер}}$ – сила тертя у парі МАІ – деталь при МАО, Н/м

$F_{\text{оп}}$ – сила опору руху деталі з боку МАІ при МАО, Н

B – магнітна індукція, Тл;

H – напруженість магнітного поля, А/м,

R_a , R_z та tr – параметри шорсткості поверхні, мкм;

k_f – коефіцієнт нерівності зерен МАП;

ВСТУП

Актуальність роботи. Стрімкий розвиток машинобудування створює новітні і оптимізує наявні методи виробництва, які покликані задовольняти нові вимоги споживача. Широка номенклатура виробів зі складними формами та з новітніх матеріалів ставить нові виклики щодо методів виробництва. Одним з таких методів є магнітно-абразивне оброблення (МАО), що представляє собою фінішний процес виготовлення деталей, особливо корисний, для деталей складного профілю (таких як лопатки газотурбінних двигунів, різальний та медичний інструмент, тощо) та необхідною високою якістю поверхонь (за параметрами Ra, Rz та r_p). Суть МАО полягає у використанні магнітно-абразивного інструменту (МАІ) сформованого в процесі МАО з магнітно-абразивного порошку (МАП), що утримується магнітним полем. Особливість утворення такого інструменту полягає у можливості керувати його жорсткістю шляхом зміни індукції магнітного поля, більше значення індукції – більші магнітні зв'язки між частинками порошку, і як наслідок – більша жорсткість інструменту. Також це дозволяє створити такий інструмент, який може приймати форму оброблюваної деталі, що дуже вигідно для оброблення складних просторових поверхонь. Тобто МАІ - це рухомо скоординований інструмент, який нівелює відносно оброблюваної поверхні складної форми. Інструмент такого типу за своїми властивостями займає проміжне положення між жорстко зв'язаним абразивним інструментом і вільним абразивом та має певні властивості струминно-спрямованого.

Відносна новизна та багатфакторність методу зумовлюють недостатню обізнаність в процесах та явищах, що мають місце при МАО, що, в свою чергу, перешкоджає широкому та ефективному використанню методу. Оскільки фактори оброблення взаємозалежать одне від одного і не можуть розглядатися поодиночці, та через подекуди різну природу факторів, постає необхідність широких та багатфакторних досліджень процесу, що забезпечить підвищення ефективності і продуктивності процесу МАО особливо деталей складної форми

типу БТНП, лопатки ГТД, кінцевий РІ і дозволить в більшій степені використовувати усі переваги і можливості методу.

Важливою проблемою при дослідженнях процесу МАО є визначення особливостей формування МАІ, оскільки властивості такого інструменту визначаються цілою низкою факторів, таких як: величина індукції магнітного поля, марка порошку та розмір і форма його частинок, швидкість оброблення, розмір, форма та матеріал деталі та ін. Така багатфакторність ускладнює розуміння функціонування інструменту та його прогнозованість. Тому визначення впливу кожного із факторів є необхідним для розуміння процесів, що відбуваються під час МАО та, як наслідок, ефективного використання МАІ.

Встановлення силових процесів та явищ, що діють на деталі з боку МАІ при обробленні критично необхідне для визначення умов і особливостей формування МАІ оскільки сили, які діють при МАО є реальним та чітким показником характеру функціонування МАІ, що прямо вказує на ефективність інструменту в процесі оброблення. Також знання сил, що діють на деталь з боку МАІ при МАО є ключем у виборі та розрахунку обладнання для проведення оброблення. Особливо це важливо для застосування методу у серійному виробництві, де коректний вибір устаткування дозволить виключити економічні витрати від виходу з ладу чи неефективного використання обладнання.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційна робота виконувалася відповідно до наукового напрямку "Дослідження властивостей магнітно-абразивного інструменту при обробці в умовах кільцевої ванни" на кафедрі конструювання машин КПП ім. Ігоря Сікорського. Результати дисертаційної роботи використані при виконанні держбюджетних НДР "Дослідження властивостей магнітно-абразивного інструменту при обробці в умовах кільцевої ванни" (№ державної реєстрації 0122U000083)

Мета і задачі дослідження

Мета роботи: Формування інструментального середовища при магнітно-абразивному обробленні в великих магнітних зазорах кільцевого типу, та дослідження явищ, які супроводжують процес оброблення з урахуванням впливу

технологічних умов процесу, реологічних характеристик МАІ, розмірів, форми та матеріалу оброблюваних деталей.

Задачі:

1. Виконати аналіз наявної інформації про умови формування МАІ, особливості силової взаємодії з оброблюваними поверхнями, явища, що супроводжують процес контактної взаємодії при МАО, вплив реологічних властивостей МАІ і технологічних факторів на оброблення.

2. Розробити методику вимірювання реальних сил, які мають місце при взаємодії магнітно-абразивного інструменту з оброблюваними деталями та створити необхідне обладнання. Визначити необхідні для дослідження матеріали та форми зразків, порошки для формування МАІ.

3. Провести комплексні дослідження зміни тангенційної складової сил взаємодії оброблюваної деталі та МАІ. Визначити вплив технологічних факторів на оброблення.

4. Дослідити характер зміни нормальної складової сил, що мають місце при взаємодії оброблюваної деталі та МАІ в реальних умовах процесу МАО. Визначити вплив технологічних факторів на оброблення.

5. Встановити вплив властивостей матеріалу, розміру та форми деталей на характер силової взаємодії між оброблюваною деталлю та МАІ з урахуванням зміни технологічних факторів процесу оброблення.

6. Визначити вплив сил при МАО на характер видалення матеріалу та ефективність процесу. Розробити рекомендації по ефективному фінішному обробленню деталей методом МАО.

Об'єкт дослідження – магнітно-абразивне оброблення деталей на верстатах з кільцевим розташуванням робочої зони.

Предмет досліджень – сили, що виникають між оброблюваною деталлю та МАІ в великому магнітному зазорі кільцевого типу.

Методи дослідження – для вирішення поставлених задач дослідження було використано основні положення теорії магнітного поля, реології, магнетизму, теорії різання матеріалів, механіки контактної взаємодії,

трибології, теоретичної механіки, матеріалознавства. Експериментальні дослідження виконано в лабораторних умовах з використанням сучасних засобів вимірювання.

Наукова новизна одержаних результатів

Розроблено експериментально-теоретичні положення підвищення ефективності оброблення деталей різної форми з магнітних і немагнітних матеріалів методом МАО на верстатах з кільцевим розташуванням робочої зони, які базуються на встановлених ефектах за визначених умов формування МАІ у великих магнітних зазорах:

1) Вперше визначено реальні сили, що виникають в результаті взаємодії МАІ з оброблюваними деталями при МАО деталей різних форм, виготовлених з феро- та парамагнітних матеріалів з урахуванням зміни технологічних факторів, таких як індукція магнітного поля, швидкість рухів при обробленні, типу, форми та розміру частинок магнітно абразивних порошків і їх реологічних властивостей, що є необхідною вхідною інформацією для розроблення технологічного процесу та підґрунтям для формування технічного завдання на розроблення спеціалізованого обладнання.

2) Експериментально встановлено наявність зв'язку між силами, що виникають при обробленні в МАІ з процесами видалення матеріалу при формуванні визначених поверхонь деталей, що дозволяє реалізовувати технологію локального формоутворення при МАО.

3) Уточнено фізичну модель механізму формування МАІ та особливостей його взаємодії з поверхнями деталей складної форми, виготовлених з матеріалів з різними магнітними властивостями в умовах великих магнітних зазорів кільцевого типу, що забезпечило підвищення ефективності і продуктивності МАО шляхом використання потенційних можливостей феро-абразивного середовища на формування технологічної спроможності МАІ.

Теоретичне та практичне значення результатів роботи

Визначено реальні сили, що мають місце в результаті взаємодії МАІ з оброблюваними деталями при МАО деталей різних форм виготовлених з феро- та парамагнітних матеріалів з урахуванням факторів оброблення. Уточнено теоретичні припущення, щодо впливу характеристик МАІ та технологічних факторів на силову взаємодію деталі та МАІ при МАО у великих магнітних зазорах. Запропоновано схему взаємодії МАІ з феро- та парамагнітними деталями. Результати дослідження дають змогу підвищити ефективність використання методу шляхом уточнення необхідних характеристик верстату та удосконалення технологічних процесів МАО.

Особистий внесок здобувача. Автором сформульовано мету та задачі, що вирішуються в дисертаційній роботі. Запропоновано методику дослідження сил при МАО в великому магнітному зазорі кільцевого типу та розроблено необхідне для цього обладнання. Виконано постановку роботи, методик та способів для досягнення поставленої мети, проведено розрахунки, експериментальні дослідження, аналіз та узагальнення отриманих результатів. Матеріали дисертаційної роботи не вміщують результати, що належать співавторам, з якими були написані роботи. В роботі наведені посилання на авторів і відповідні джерела при використанні відомих теоретичних положень та експериментальних даних.

Публікації. За основними результатами дисертаційної роботи опубліковано 6 статей у провідних фахових виданнях в Україні. Результати дослідження також представлено в 7 тезах доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел із 81 найменувань на 9 сторінках та 2 додатків. Основний текст дисертації викладено на 101 друкованій сторінці, що містить 62 рисунки, 9 таблиць. Повний обсяг дисертації становить 138 сторінок.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ЯВИЩ, ЩО СУПРОВОДЖУЮТЬ ПРОЦЕС ФОРМУВАННЯ ІНСТРУМЕНТАЛЬНОГО СЕРЕДОВИЩА ПРИ МАГНІТНО АБРАЗИВНОМУ ОБРОБЛЕННІ

1.1 Процес МАО та його особливості

Можливість ефективного процесу МАО визначається виконанням наступних основних умов оброблення [1 – 3] (рис. 1.1):

- Наявність притиску частинок МАП до оброблюваних поверхонь деталі, що зумовлене магнітними силами або динамічними факторами, тобто наявність нормальної складової різання.
- Наявність відносного руху між частинок МАП та оброблюваними поверхнями, тобто тангенційна складова різання.
- Можливість формування стабільного МАІ, тобто здатність до перемішування і відновлення форми інструменту, відсутність викидання порошку з зон оброблювання і його прогнозоване розподілення в робочому зазорі.
- Рівномірний рух частинок МАП відносно оброблюваної поверхні без утворення застійних і тіньових зон біля поверхні деталі,

Ці умови є невід’ємними для проведення ефективного процесу МАО, та по суті, мають вирішальний вплив на процеси та явища, що мають місце при МАО, а також на силові характеристики процесу.

Тобто, процеси та явища, що мають місце в процесі МАО та визначають величину та характер дії сил, що виникають в результаті взаємодії між деталлю та МАІ необхідно розглядати з урахуванням цих чотирьох факторів. Для розуміння процесу формування інструментального порошкового середовища, яке формується в процесі оброблення реальних деталей – МАІ, необхідно дослідити величину сил (як тангенціальну так і нормальну складові), що виникають при взаємодії між МАІ та оброблюваною деталлю при МАО, а також процеси та явища, що виникають у МАІ в процесі оброблення деталей різного типу.

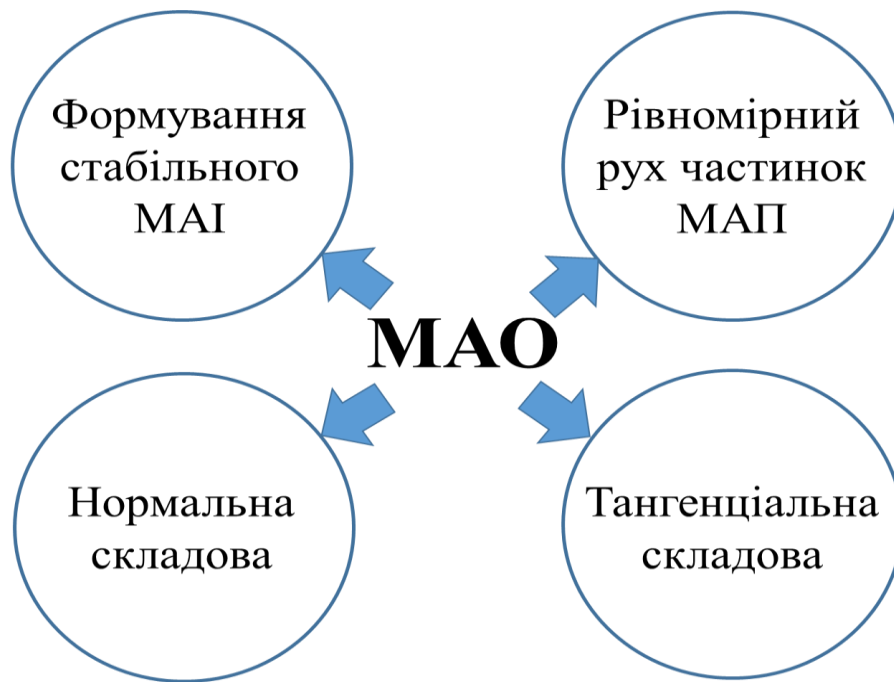


Рис. 1.1 Умови, що необхідні для забезпечення ефективного процесу МАО

1.2 Аналіз факторів що впливають на формування МАІ та сили, що діють при МАО

Для того, щоб визначити зусилля, що виникають при МАО між деталлю та МАІ а також процеси та явища, що супроводжують формування МАІ, необхідно розглянути сам процес МАО, з точки зору формування інструментального фераобразивного середовища в умовах слабких магнітних полів, особливостей самого процесу, та дію на нього багатьох чинників різної природи, та різного походження (рис. 1.2). Найбільш очевидними процесами, що виникають під час оброблення є механічні процеси. Це насамперед, механічне тертя між оброблюваною поверхнею та частинками порошку з наступним зніманням матеріалу. Також, не менш важливими, є процеси всередині МАІ – механічна взаємодія між частинками порошку. Частинки порошку при обробленні повинні перемішуватися (одна з необхідних вимог для забезпечення ефективного МАО). Це явище сприяє оновленню різальних кромek зерен порошку та відвід елементів диспергованого матеріалу з зони різання, проте також це створює додаткові силові навантаження, що впливають на оброблення. Сили, які виникають в результаті дії певних додаткових сил

магнітного походження і їх похідних -магнітної взаємодії частинок магнітно-абразивного порошку між собою та з оброблюваною поверхнею (у разі оброблення феромагнітної деталі). Ця взаємодія прямо впливає на силові навантаження у процесі оброблення [1 – 20]. Також при обробленні можлива адгезійна взаємодія між оброблюваною поверхнею та частинками порошку [5, 6, 21 – 23]. Електричні процеси при МАО представлені пондеромоторними силами, що викликані локальними мікрополями в середовищі МАІ [1, 2, 24].

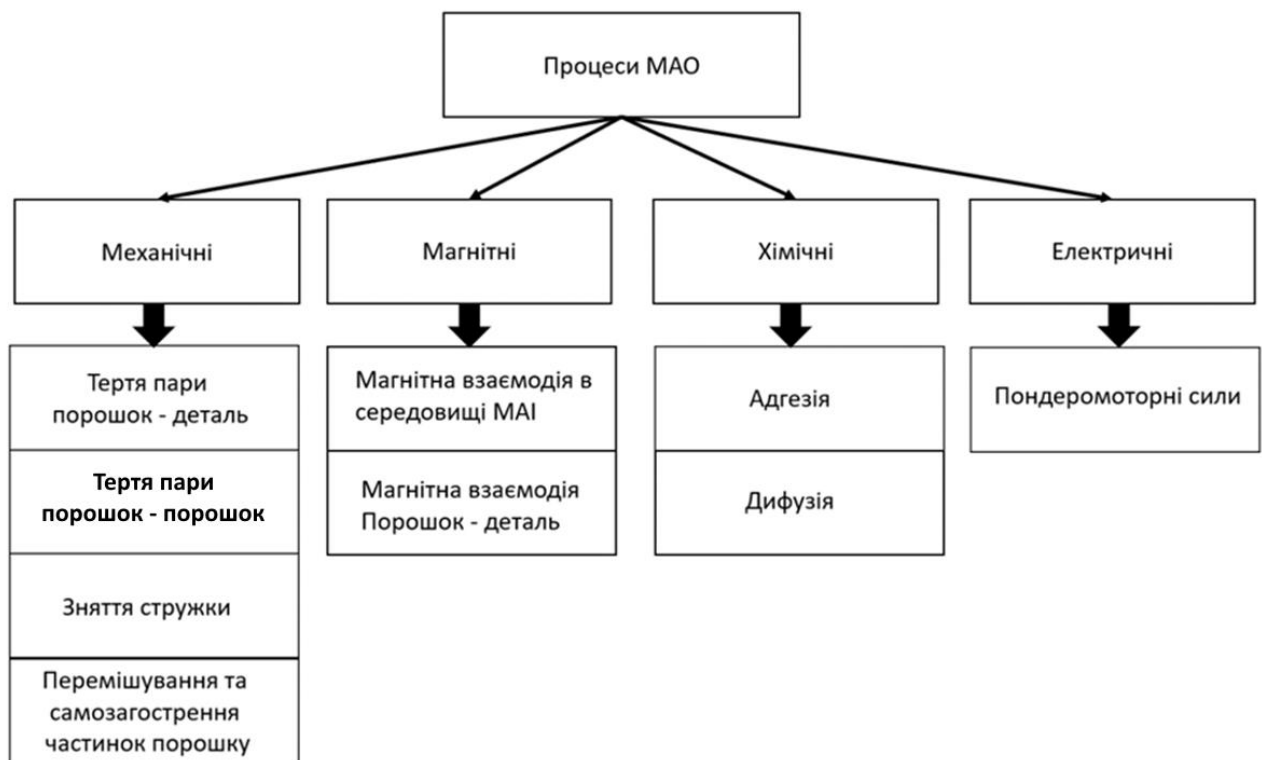


Рис. 1.2. Процеси, що супроводжують МАІ

Як і будь-який метод оброблення різанням, процес МАО змінюється в залежності від технологічних параметрів. Проте з оглядом на суть МАО, ці технологічні параметри мають свої особливості, насамперед це присутність магнітної складової, що приймає участь у формуванні МАІ та прямо впливає на його характеристики. На рис. 1.3 зображено схему технологічних факторів, що мають безпосередній вплив на величину сил, що виникають при МАО та процеси формування МАІ.

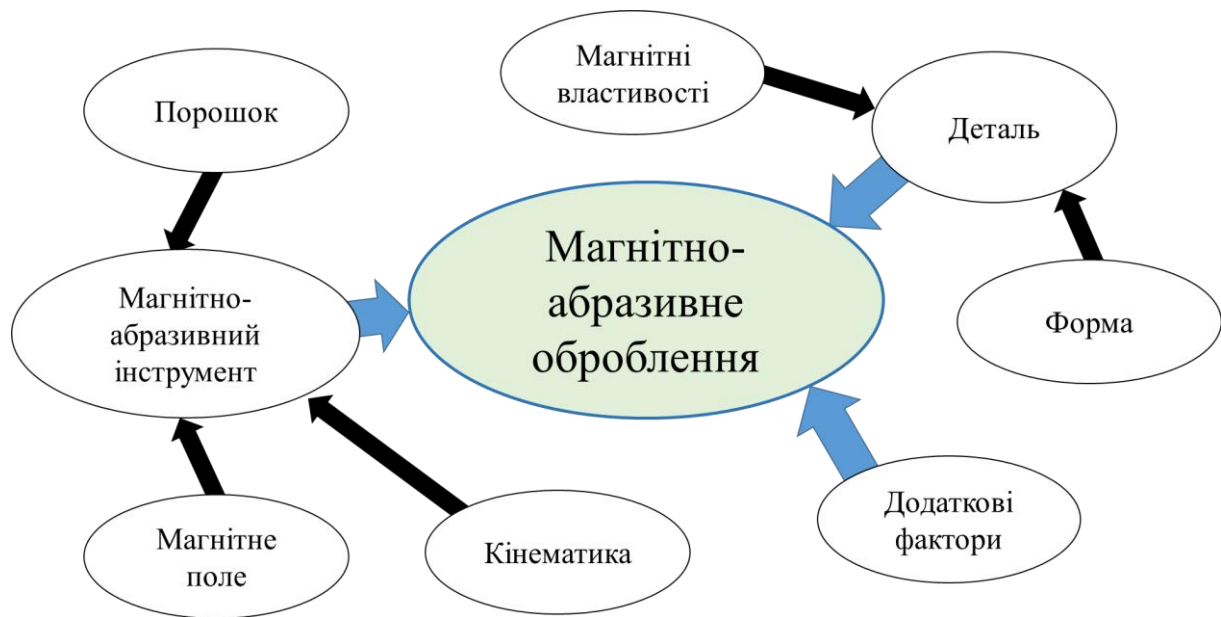


Рис. 1.3. Фактори, що впливають на процес MAO та величину сил взаємодії між деталлю та МАІ

З огляду на це доцільно окремо розглянути вплив кожного з цих факторів на MAO.

1.2.1 Складові магнітно-абразивного інструменту та їх особливості

Основним фактором від якого безпосередньо залежить будь який метод оброблення різанням є інструмент. У випадку MAO, інструмент представляє собою середовище магнітно-абразивного порошку, що утримується в робочій зоні за допомогою магнітного поля та остаточно формується в процесі MAO за рахунок динамічної взаємодії оброблюваної деталі та частинок порошку. По аналогії з обробленням абразивним інструментом є абразивні частинки – порошок, та зв'язка. Зв'язкою тут виступає магнітне поле, тобто частинки утримуються між собою за допомогою магнітних сил. Тому магнітно-абразивний інструмент можна розкласти на 3 складові: магнітно-абразивний порошок, магнітне поле (зв'язка) та кінематика і динаміка оброблення.

Перш за все, розглянемо особливості **магнітно-абразивних порошків**. Головною особливістю МАП у порівнянні з звичайними абразивними порошками є їхня здатність взаємодіяти з магнітним полем. Тому до таких порошків ставлять не тільки вимогу до твердості та абразивної здатності, а й до

їх магнітних властивостей. З огляду на це, матеріал з якого створений порошок або має виконувати обидві вимоги, або представляти собою композицію з двох матеріалів, кожен з яких виконує дві окремі функції – абразивну та магнітну. На початкових етапах використання методу застосовували порошки виготовлені з однорідного матеріалу що задовольняв зазначені вище вимоги. Прикладами таких порошків є ферити, альсифер, альпер, та чавун (ДЧК) [2, 3, 6, 25] Також використовуються порошки зі швидкорізальної сталі (Р6М5) [3]. Ці матеріали крім магнітних властивостей мають також задовільну твердість. Проте порошки, виконані з композицій матеріалів, мають кращі експлуатаційні характеристики у порівнянні з однорідними порошками [2, 26 – 28]. Прийнято класифікувати такі композиційні порошки за методом їх отримання.

Механічні суміші – порошки складені з феромагнітних та абразивних частинок і часто застосовують у вигляді суспензій. Як феромагнітна складова використовують залізо, сталь (магніто-м'які матеріали), ферити, сплави заліза з алюмінієм, кобальтом та нікелем (магніто-тверді). Магніто-тверді матеріали використовуються в змінних магнітних полях через їх високу коерцитивну силу та залишкову індукцію. Натомість магнітно-м'які – легко намагнічуються та розмагнічуються, через що такі матеріали використовують в постійних магнітних полях [25]. Абразивною складовою в таких порошках можуть бути матеріали що застосовуються і в звичайних абразивних інструментах, такі як алмаз, карбід бору, корунд чи ельбор. Механічні суміші застосовують у вигляді суспензій в установках з дією «рухомих» магнітних полів, де магнітні частинки ініціюють рух абразивної складової [25].

Керметні порошки – гетерогенна композиція феромагнітної основи та керамічних (абразивних) включень. Ці порошки отримані методами порошкової металургії. Зазвичай в якості магнітної основи використовують залізо, а для абразивної частини використовують оксиди, карбіди або бориди. Склад абразивної частини зазвичай становить 10 – 30% [4, 22, 25, 28 – 34].

Литі порошки – виготовлені з розплаву як однорідного матеріалу, наприклад чавун, або з композиційного матеріалу з феромагнітною основою та

включеннями абразивних частинок (карбідів, боридів, нітритів). Прикладами таких порошків є марки Полімам та Царамам [25].

Технологія виготовлення порошку також впливає на форму частинок. Форма частинок магнітно-абразивного порошку прямо впливає на характер оброблення тому на фактором форми не варто нехтувати. Існують дві основні форми частинок:

- Оскольчаста, отримана шляхом розмелу часток створених методом розпилення з розплаву. Прикладом такого типу є порошки марок Полімам-Т, СП-17, ДЧК (дріб чавунна колота).
- Округла, отримана методом розпилення з розплаву без подальшого розмелу. Наприклад – Р6М5, Полімам-М, Царамам [2, 3, 25], ДЧ (дріб чавунна).

Дослідження [1 – 3, 22, 25, 32 – 37] показують що форма частинок порошку прямо впливає на характер оброблення. Гострі кромки осколькового порошку мають тенденцію до більшого врізання в матеріал, а і тому і до формування більших мікронерівностей на оброблюваних поверхнях та більшого об'єму диспергованого матеріалу. Натомість оброблення порошком округлої форми більше сприяє, переважно, вигладжуванню і наклепу поверхні оброблюваної деталі [32 – 37].

Ще одною важливою складовою МАІ є **магнітне поле**. Від нього в певній мірі залежать в'язкість і жорсткість інструменту, та однією з переваг МАО загалом, є можливість змінювати ці параметри навіть не зупиняючи процес оброблення. Низка досліджень [3 – 6, 36 – 38,] вказують на безпосередній вплив індукції магнітного поля на оброблення і особливо на продуктивність процесу МАО. Оскільки жорсткість МАІ впливає на характер зняття матеріалу, тобто можливість проведення або умовно чорнових, або умовно чистових операцій.

Через властивості магнітних полів, створення полюсних наконечників магнітної системи має свої особливості. У роботах [1 – 4, 27 – 38] показано, що значення магнітної індукції в робочому зазорі неоднорідне і концентрація

магнітного потоку відбувається на гострих краях полюсних наконечників. Більш того, встановлено що магнітне поле розповсюджується на 20 мм за межі робочої зони (рис. 1.4). Такий градієнт магнітного поля спричиняє розрідженню або ж ущільненню МАІ в певних зонах оброблення, що спричиняє відмінності в характері оброблення та, як наслідок різні значення сил при взаємодії між деталлю та МАІ [1, 2, 27, 36, 39].

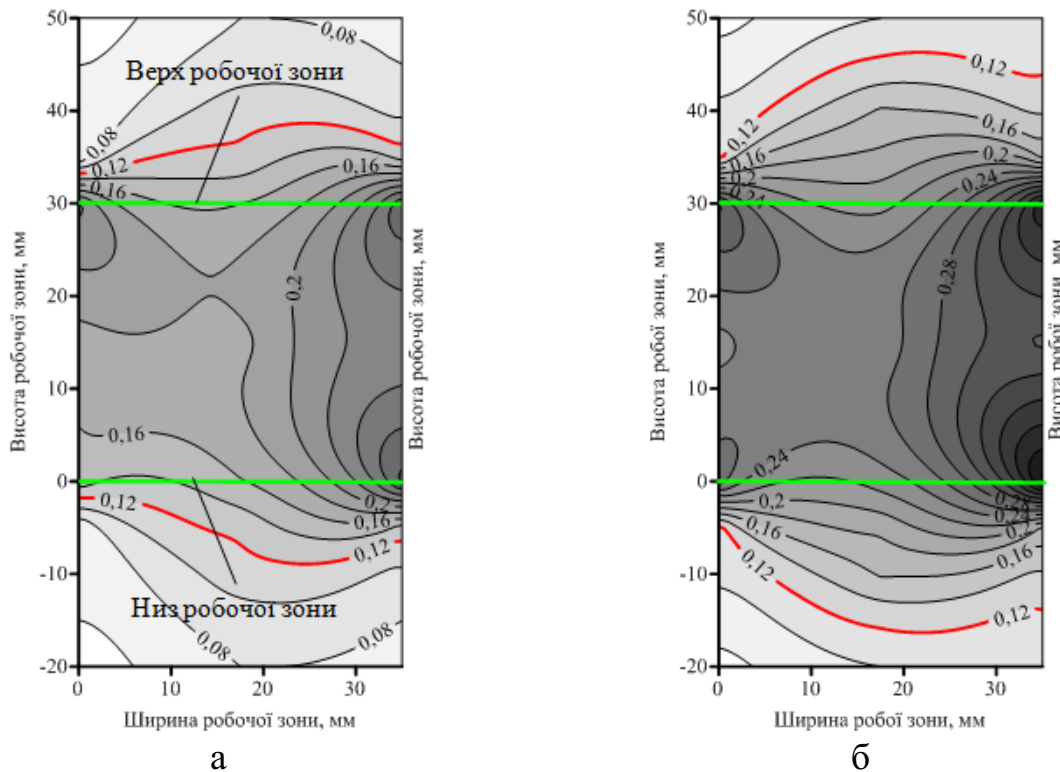


Рис. 1.4. Топограми градієнту магнітної індукції в великому робочому зазорі при величині напруженості магнітного поля а) – 143,2 кА/м, та б) – 198,9 кА/м [3, 36]

Варто зазначити про наявність в процесі оброблення **пондеромоторних сил**, що також можуть впливати на силові характеристики МАО. Вважається, що пондеромоторні сили, які виникають в представницьких об'ємах порошку, можуть локально змінювати величину магнітного поля, що, в наслідок, змінює характер оброблення та впливає на процеси переформування ферабразивного середовища, величину та характер сил, що виникають при МАО [1, 2, 24]. Проте, закономірності виникнення та характер впливу пондеромоторних сил на МАО і досі залишаються недостатньо вивченими і потребують подальшого дослідження.

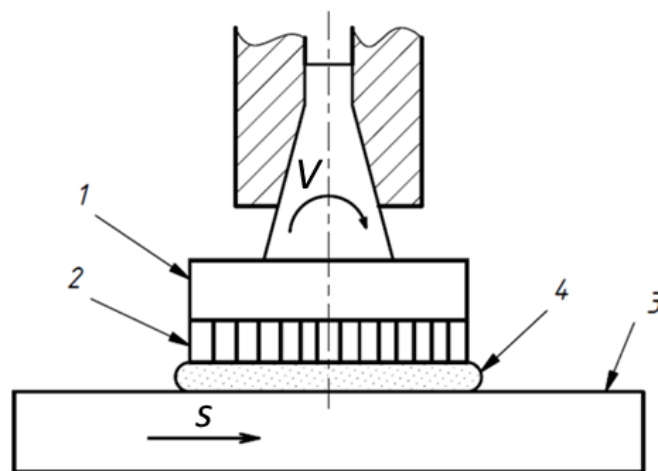
Не менш важливою особливістю оброблення є **магнітний зазор**, тобто відстань між полюсним наконечником та поверхнею деталі що заповнена середовищем МАІ. Розмір зазору відносний і залежить від розміру зерен магнітно-абразивного порошку. Магнітні зазори умовно поділяють на малі коли відстань між полюсними наконечниками і поверхнями деталей складає величину $h = (3 - 5)\lambda$ та великі ($h \geq 10 \lambda$) де λ – середній розмір частинки порошку. Схеми з малими магнітними зазорами використовують при обробленні деталей простої форми, де можливе забезпечення мінімальної відстані між поверхнею оброблюваної деталі та полюсними наконечниками. Схеми з великими магнітними зазорами необхідні для оброблення деталей складної форми, при обробленні яких практично неможливо створити (забезпечити) мінімальну відстань між оброблюваною поверхнею та магнітним полюсними наконечниками [3]. Проте, величина магнітного зазору впливає на характер оброблення. Вважається що при малих магнітних зазорах на характер оброблення впливають переважно магнітні сили, що визначають сили і умови притискання МАП до оброблюваної поверхні, при обробленні з великими зазорами переважає вплив динамічних факторів, тобто механічної взаємодії частинок порошку, процесів перемішування та заклинювання частинок. Варто зазначити, що магнітно-абразивний порошок для різних зазорів повинен задовольняти різним вимогам. Так як значний вплив механічного навантаження на деталь і порошок при роботі в великих зазорах підвищеної міцності частинок порошку, тому рекомендується використовувати порошки виготовлені з розплаву що мають вищу міцність. В роботі [40] досліджено вплив величини робочого зазору на величину видалення матеріалу деталі, так збільшення зазору з 0,4 до 0,7 мм призводить до інтенсифікації оброблення приблизно у 2 рази. Така інтенсифікація прямо впливає на величину та розподіл сил при МАО.

Кінематика оброблення. Схеми оброблення

Магнітно-абразивне оброблення дозволяє проводити фінішні операції для широкої номенклатури виробів, від виробів простої форми, до виробів складної

просторової конфігурації (таких як кінцевий різальний інструмент, медичні вироби, лопатки ГТД). В залежності від типів оброблюваних деталей (плоскі, циліндричні деталі, внутрішні та зовнішні поверхні) існує значна кількість схем оброблення з різноманітним обладнанням для проведення процесу подекуди з різною кінематикою оброблення [4 – 6, 18, 22, 41 – 44]. Кожна схема оброблення зумовлює різну взаємодію між деталлю та МАІ, що відзначається на силах при МАО.

Схеми МАО з малим магнітним зазором дозволяють оброблення деталей простої форми. Прикладом схеми з магнітним зазором є схема для оброблення плоских поверхонь (рис. 1.5). На індукторі – 1, що обертається з рахунок шпинделя верстата, розташовані полюсні наконечники – 2. Деталь – 3 оброблюється за допомогою МАІ – 4, яке формується на полюсних наконечниках. Рухами оброблення є обертання (V) та прямолінійний рух (S). [22, 42, 45 – 50]



1.5 Схема МАО плоских поверхонь

Схема МАО з великим кільцевим зазором дозволяє оброблення досить широкого спектру деталей, особливо це стосується деталей складної просторової конфігурації (рис. 1.6). Система складається з робочого зазору кільцевої форми що обмежується полюсними наконечниками – 1 (рис. 1.6), в зазорі розташовується МАІ – 2, та рухається оброблювана деталь – 3. Деталь має можливість як рухатися по кільцевій ванні так і обертатися навколо власної осі. Електромагнітна котушка – 4 забезпечує створення регульованого

магнітного поля між полюсними наконечниками. Фактично єдиним обмеженням для такої схеми є габарити оброблюваної деталі [3, 7, 36, 42, 43, 52 – 56].

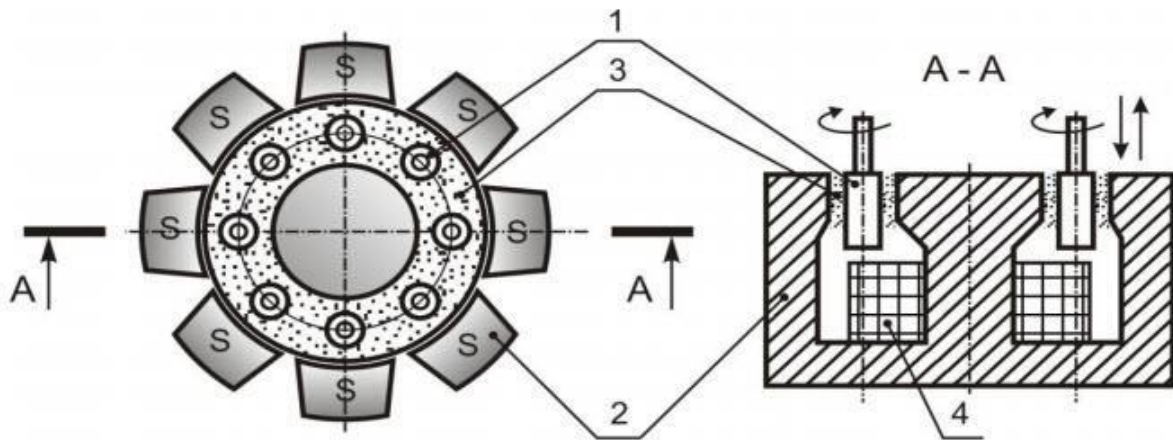


Рис. 1.6. Схема МАО в кільцевій ванні [22, 52, 53]

Особливості формування структури МАІ у робочій зоні

В роботах [3, 36] показано, що рух деталі у кільцевій робочій зоні зумовлює утворення ущільненої зони МАП перед деталлю, що рухається разом з нею. Позаду деталі утворюється розріджена зона зумовлена тим, що після проходження деталі МАІ не встигає відновитися. Таке явище може зумовлювати неоднорідності оброблення деталей (більший ступінь оброблення попереду та менший позаду), що безпосередньо викликає відмінності у величині сил, що мають місце при взаємодії між оброблюваною деталлю та МАІ у різних зонах деталі. Додатково переміщення мас порошку в робочому зазорі змінює градієнт магнітного поля, що у свою чергу впливає на оброблення та величину сил при МАО [3, 36, 39, 57]. Важливою складовою у розумінні МАО та процесів, що його супроводжують є структура МАІ у робочій зоні. МАІ, що створений внаслідок взаємодії МАП з магнітним полем, складається з окремих квазістабільних угруповань порошку. Існує три види таких формувань (рис. 1.7). Мертва зона, що розташована на стінках полюсних наконечників, представляє собою суцільний малорухомий шар ущільненого МАП товщиною 5 – 6 мм. Конусоподібні утворення, що одною стороною «закріплені» до «мертвої» зони мають здатність до коливального руху при проходженні деталі

через них. Їх діаметр становить 3 – 3,5 мм, довжина 11,5 – 12 мм . Незакріплені веретеноподібні формоутворення знаходяться у проміжках між конусами та мають здатність до активного руху і переформування у робочій зоні під впливом руху оброблюваної деталі [3, 36, 39, 57, 58] тобто знаходяться в кавзістабільному стані.

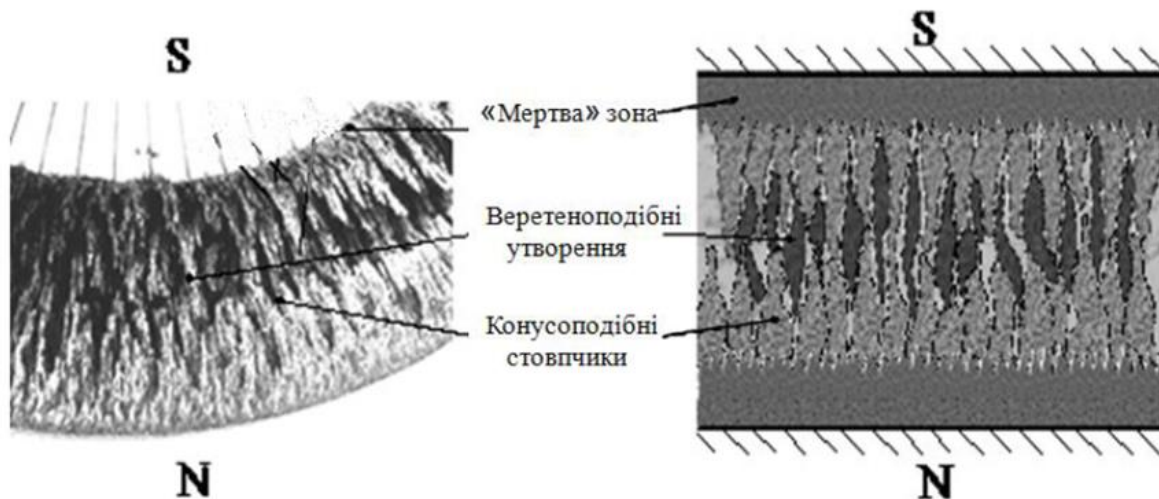


Рис. 1.7. Порошкові утворення в середовищі МАІ [3, 36]

З огляду на різні характер та розташування вищезазначених структурних формувань у робочій зоні, кожне з них взаємодіє з оброблюваною деталлю у різний спосіб. Так роботи [3, 36, 39, 57, 58] вказують на особливості взаємодії деталі з утвореннями МАІ при МАО в великих магнітних зазорах. На рисунку 1.8 зображено етапи взаємодії деталі з МАІ позначено цифрами 1, 2, 3 (пунктиром позначено попередні положення). Точка D відповідає зоні перед деталлю з підвищеним ступенем ущільнення МАІ. Точка R відповідає моменту «розриву» протилежно розташованих конусоподібних стовпчиків і об'єднанню суміжно розташованих веретеноподібних формувань. Точка F відповідає моменту відриву розтягнутих об'ємів веретеноподібних ущільнень і конусоподібних стовпчиків, обтікаючих поверхню і в подальшому приймають участь у відновленні структури МАІ. Варто зазначити, що після проходження деталі утворюються розріджені («тіньові») зони в якій оброблення практично не відбувається [3, 36, 39, 57, 58].

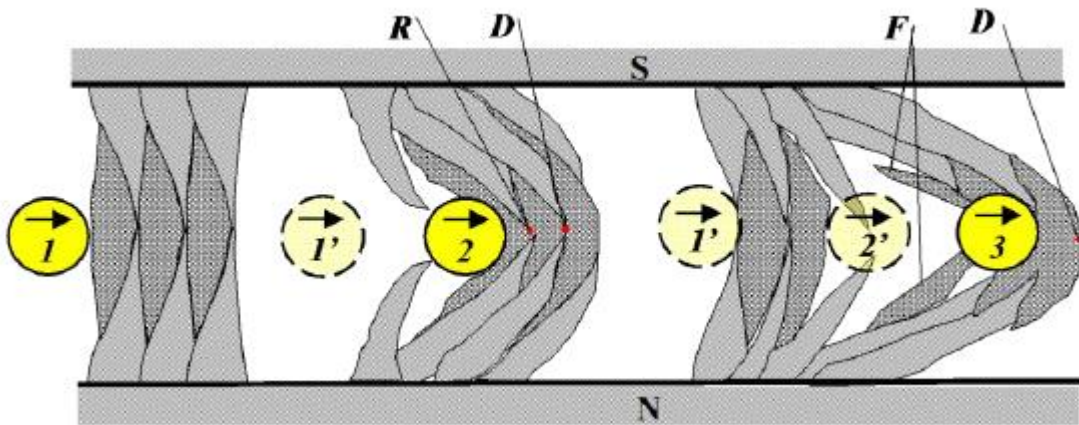


Рис. 1.8. Схематичне зображення характеру взаємодії деталі з різними формуваннями МАІ [3, 36]

Варто зазначити, що середовище магнітно-абразивного інструменту при МАО може мати різний характер «течії», тобто можливий як стабільний рух частинок МАІ так і хаотичний. В роботі [2] визначено, що в'язкість МАІ в процесі МАО не є сталою і зменшується зі збільшенням швидкості оброблення. Особливо різке зниження в'язкості спостерігалось на швидкості 0,1 – 1 м/с від 200 – 800 пуаз до 30 – 60 пуаз, при швидкостях 1 – 3 м/с зниження не настільки інтенсивне. Зменшення в'язкості призводить до переходу зі стабільного руху середовища МАІ до хаотичного за аналогією до ламінарного та турбулентного характеру течії рідини. Автором [2] запропоновано визначення відношення інерційної сили до сили в'язкості через число Рейнольдса. При малих значеннях числа Рейнольдса визначальною в процесі МАО є сила в'язкості МАІ, а при високих значеннях числа Рейнольдса - стає визначальною інерційна сила [2].

1.2.2 Особливості впливу характеристик деталі на формування МАІ

Магнітно-абразивне оброблення, з огляду на свої технологічні особливості може змінювати свій характер в залежності від характеристик оброблюваної деталі. Магнітні властивості оброблюваної деталі можуть прямо впливати на перебіг процесу МАО, адже магнітна деталь взаємодіє як з магнітним полем, так і з магнітно-абразивним порошком. Магнітна взаємодія феромагнетиків під час МАО перш за все проявляється у притягуванні частинок МАІ до поверхні оброблюваної деталі. У роботах [7, 43, 59] автор вказує на те,

що при обробленні феромагнітної деталі градієнт магнітної індукції спрямований у бік деталі, що спрямовує частинки МАІ до поверхні деталі, натомість при обробленні немагнітних деталей градієнт магнітної індукції спрямований у бік полюсних наконечників. Обробка немагнітних деталей у цьому випадку проводиться тільки за рахунок опору середовища МАІ (динамічні сили). Тобто магнітні властивості деталі додатково збільшують притиск частинок МАІ до деталі, і тому, збільшує величину сили взаємодії МАІ та деталі. Також попередня якість поверхні та розміри мікронерівностей можуть впливати на інтенсивність та якість оброблення.

1.2.3 Додаткові фактори, що мають вплив на формування МАІ та величину сил при взаємодії МАІ та деталі

До додаткових факторів можна віднести процеси та добавки, наявність яких не є обов'язковими для процесу МАО, проте можуть суттєво змінювати характер оброблення.

Для підвищення інтенсифікації процесу оброблення використовують додаткові осцилюючі рухи що покращують шорсткість оброблюваної деталі, а також дозволяють МАІ ефективніше оновлюватися шляхом перемішування та самозагострювання частинок МАІ [5, 6]. Для МАО важкооброблюваних матеріалів можливе використання попереднього хімічного протравлення. Такий спосіб представлений в роботі [23] і полягав у використанні хімічного протравлення з нагрівом для покращення оброблюваності нікелевого сплаву Inconel 625. Дія хімічних сполук та високої температури призводить до розрихлення поверхневого шару, який в подальшому видаляється при МАО, тим самим полегшуючи процес різання. Також на процес різання можна позитивно впливати шляхом використання змащувально-охолоджуючих технологічних середовищ (ЗОТС). Суть використання ЗОТС полягає у зменшенні температури оброблення, виводу мікростружки, або ж зменшенням поверхневої енергії оброблюваного матеріалу [5, 6]. ЗОТС сприяють активізації руху стружки та частинок порошку в середовищі МАІ, що забезпечує інтенсифікацію процесів оновлення і самозагострення частинок МАІ.

Полегшення процесу різання можливо через наявність у ЗОТС поверхнево-активних речовин (ПАР) що сприяють знеміцненню матеріалу поверхні оброблювальної деталі [21, 22] шляхом молекулярного розклинювання мікротріщин оброблюваного матеріалу (рис. 1.9). Також можливе комбінування додаткових факторів таких як осцилюючих рухів та ЗОТС що доповнюють один одного інтенсифікуючи процес оброблення за допомогою зниження поверхневої енергії оброблюваного матеріалу та інтенсифікації процесів очищення та оновлення частинок МАІ [5, 6].

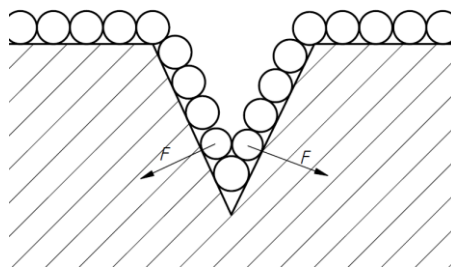


Рис. 1.9. Схема абсорбційного розклинювання ПАР [6]

У роботах [2, 27, 55, 60, 61] розроблено метод підвищення ефективності оброблення лопаток ГТД в установках MAO кільцевого типу шляхом введення осцилюючих рухів при обробленні. Суть методу полягала у тому, що оброблюваній лопатці крім руху вздовж робочої зони був наданий коливальний рух, що дозволив лопатці провертатися на певний кут, тим самим залучаючи в процес оброблення більш ущільнені зони порошку, розташованих біля поверхонь полюсних наконечників. Визначено, що такий метод дозволив підвищити ефективність оброблення і забезпечити отримання необхідних радіусів заокруглення кромek лопаток ГТД [2, 27, 55, 60, 61].

1.3 Аналіз попередніх досліджень сил, що виникають при MAO.

Перші спроби дослідити силові явища що виникають при магнітно-абразивному обробленні було наведено у роботах [4, 38, 62]. Було висунуто припущення, що на зерна магнітно-абразивного порошку діє комплекс сил механічного, магнітного та електромагнітного походження, що на пряму залежить від властивостей порошку, магнітного поля, схемою оброблення та ін.

[4]. В роботі пропонується представляти результуючу силу, що діє на одиничне зерно порошку, за формулою (1.1):

$$F_p = F_M + F_{M1} + F_{em} + F_{em1} + F_T + F_{in} + F_{вц} + F_{MT} + F_{тер} \quad (1.1)$$

Де, F_M - магнітна сила, викликана взаємодією молекулярних потоків матеріалу зерна з зовнішнім полем, F_{M1} - додаткова магнітна сила, викликана прагненням еліпсоїдного зерна орієнтуватись вздовж силових ліній поля, F_{em} - електромагнітна сила взаємодії індукційних потоків зерна з зовнішнім пульсуючим полем, F_{em1} - електромагнітна сила взаємодії індукційних потоків зерна в робочому зазорі, F_T - сила тяжіння, F_{in} - сила інерції, що виникає при зіткненні зерна, що рухається з оброблюваною поверхнею, $F_{вц}$ - відцентрова сила, що виникає при обертанні зерна з магнітним індуктором, F_{MT} - магнітний тиск, $F_{тер}$ - сила тертя [4]. Вірогідний розподіл складових сил взаємодії представлено у табл. 1.1. Вказано, що ці складові можуть бути оцінено попередньо при деяких узагальнених умовах, та (при їх малій величині) можна знехтувати. Проте, сили магнітного тиску та тертя можна визначити тільки в ході розрахунку взаємодії у робочому зазорі [4].

Таблиця 1.1. Розподіл складових сил взаємодії при МАО. [4]

Позначення	Значення сили, Н
F_M	$(2..10) \cdot 10^{-4}$
F_{M1}	$(7...15) \cdot 10^{-4}$
F_{em}	$(2...12) \cdot 10^{-9}$
F_{em1}	$4 \cdot 10^{-9} .. 2 \cdot 10^{-7}$
F_T	$2,5 \cdot 10^{-7}$
F_{in}	$6,5 \cdot 10^{-6}$
$F_{вц}$	$(1...1) \cdot 10^{-6}$

Було розроблено аналітичну методику визначення сил, що діють в порошковому середовищі (наприклад напруженнями, що діють в масі МАП). Враховувалися сили питомого магнітного тиску, щільність порошку, величина магнітної індукції, питомі сили тертя (тангенціальної складової) та питомі сили тиску, що виникають в процесі оброблення. Згідно з розрахунком сил, що діють

в масі МАІ було запропоновано методику розрахунку сил різання в умовах рухомої заготовки на прикладі плоского магнітного зазору.

Також автор вказує на те, що тиск на циліндричну деталь зі сторони МАІ не є однаковим по всій поверхні деталі і змінюється в залежності від рухів деталі в робочій зоні. На рис. 1.10 показано, що найбільший тиск на деталь має місце на фронтальній частині деталі на яку безпосередньо створюється тиск «набігаючого» потоку МАІ. Натомість позаду деталі цей тиск суттєво менший. Звідси і нерівномірність оброблення поверхонь деталі, що зумовлює необхідність додаткових рухів при обробленні (наприклад обертання деталі навколо своєї осі).

Також в цій роботі показано можливість протікання мікро потоків струму через окремі маси порошку, що підтверджує наявність явища пондеромоторних сил між частинками МАІ при МАО.

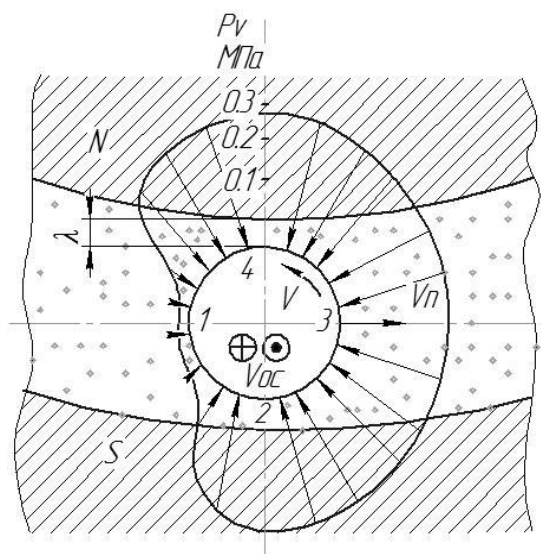


Рис. 1.10. Епюра розподілу нормальних тисків при МАО в робочій зоні кільцевого типу [4]

Загалом, у роботі було розроблено аналітичні методику розрахунку сил, що мають місце у робочій зоні наповненій порошком при МАО, та, як наслідок, аналітичні методи розрахунку сил різання та сил, що діють на деталь при МАО. Недоліком наведеної роботи є обмеженість в дослідженні реальних значень сил, що виникають при МАО, тобто аналітичні твердження не підкріплені результатами експериментальних досліджень. Також зазначено, що аналітична

методика розрахунку сил не є універсальною для всіх схем оброблення та технологічних параметрів (таких як великий чи малий магнітний зазор) та може бути справедливою тільки для окремої групи схем оброблення зі схожою конфігурацією робочої зони.

У роботі [63] показано вплив магнітних сил та сил різання на явище нестабільного перемішування порошку при обробленні внутрішніх циліндричних поверхонь. Для досягнення мети було визначено тангенціальні сили, що виникають при внутрішньому поліруванні. Для цього було зчитано реальні зусилля з боку МАІ, що створюють опір обертанню оброблюваної деталі. Схема оброблення показана на рис. 1.11 порожнинна деталь (труба) 1 обертається навколо своєї осі. Магнітно-абразивний порошок 2 поміщений в середину деталі. Поліусні наконечники 3 що знаходяться ззовні деталі притискають МАП до внутрішньої поверхні деталі.

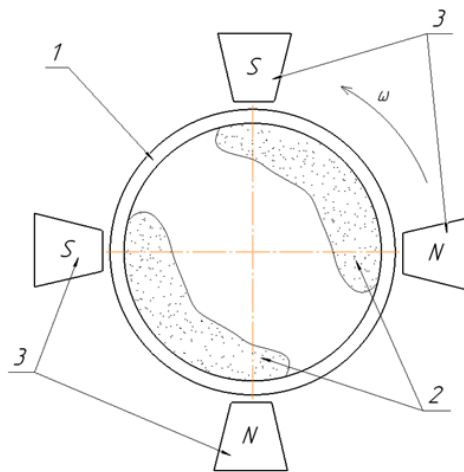


Рис. 1.11. Схема МАО внутрішніх поверхонь обертання

Автори стверджують, що стабільне оброблення деталей при такій схемі можливе при правильному співвідношенні магнітної сили притиску та сили різання. Тангенційна сила різання визначалася за допомогою датчика крутного моменту що визначав зусилля витрачені на обертання деталі при МАО. Для визначення нормальної складової сили використовували щільність магнітного потоку, виміряну датчиками Хола на верхівках полюсних наконечників. щільність магнітного потоку використали для обрахунку сили притягнення

частинок МАП до наконечників, що приймали за тиск МАП на оброблювану поверхню [48, 63].

Робота показала реальні значення тангенційної сили при МАО внутрішніх поверхонь обертання, проте цю методику можливо використати тільки для даної схеми МАО. Також у роботі обмежено розкрито вплив технологічних параметрів (типу, зернистості порошку, швидкості оброблення) на сили, що виникають при обробленні.

Низка робіт [45 – 47, 49 – 51] зосереджених на дослідженні величини сил при МАО плоских поверхонь використовують методики, які дозволяють визначати реальні значення сил при обробленні плоскої поверхні. Методики мають певні відмінності у типі обладнання, кількості електромагнітних полюсних наконечників та наявності додаткових рухів різання проте суть схожа, та полягає у використанні динамометра, що дозволяв фіксувати та передавати значення навантажень, що безпосередньо діяли на оброблювану деталь в процесі МАО. Одна з таких схем зображена на рисунку 1.12. Спосіб вимірювання базувався на тому, що під час оброблення деталі за даною схемою оброблення існує сила притиску порошку до деталі, а також деталь сприймає крутний момент від притиску та обертання магнітного наконечника. Значення величини притиску (нормальна складова сили) та крутного моменту (тангенціальна складова) безпосередньо фіксувалися динамометром, що передавав їх до ПК.

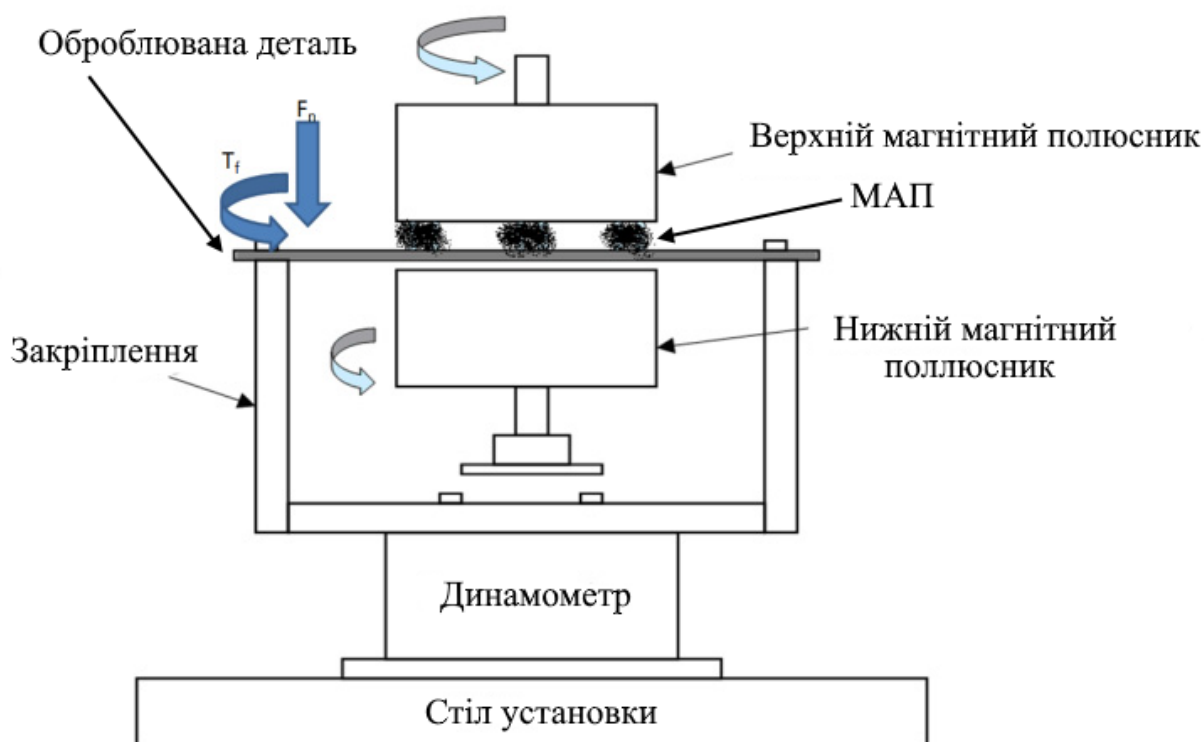


Рис. 1.12. Схема вимірювання сил при МАО при обробленні плоских деталей

Варто зазначити, що магнітний зазор під час досліджень становив 1,5 – 2 мм, тобто данні дослідження слід відносити до МАО в умовах малих магнітних зазорів. Були визначені залежності від величини магнітного зазору, швидкості обертання полюсного наконечника [45 – 47, 49 – 51].

Данні дослідження дозволяють оперувати реальними значеннями нормальних та тангенціальних сил, що виникають при МАО плоских поверхонь. Також показують методику для безпосереднього вимірювання сил, яку можливо модифікувати під інакші умови оброблення. Оскільки оброблення відбувалося в умовах малих магнітних зазорів, результати дослідження не є справедливими для умов великих магнітних зазорів, та, як наслідок, не враховує особливостей реології МАІ, що відрізняються при суттєвій зміні магнітного зазору. Також результати дослідження є справедливими тільки для схем плоского полірування.

В дослідженні [7] виконано теоретичні розрахунки величини сил, що виникають між МАІ та деталлю, та кінематики процесу МАО при обробленні

деталей складної просторової конфігурації. При розрахунках магнітних та інерційних сил було враховано магнітну індукцію поля, відносну магнітну проникність порошку, густину порошку, розмір зерна порошку, швидкість руху деталі, матеріал деталі. Отримані залежності дають певне розуміння розподілу магнітних та інерційних сил для деталей складної форми, проте не показують реальних процесів та явищ, що виникають під час МАО.

У дослідженнях спрямованих на підвищення якості багатограничних непереточуваних твердосплавних пластин [64] та мітчиків [52] було розроблено методи аналітичного розрахунку кінематики руху оброблюваних БНТП та мітчика в кільцевому зазорі при МАО. Засновуючись на кінематиці руху було запропоновано метод визначення інтегральної інтенсивності оброблення, що представляє собою енергетичний аспект взаємодії зерен та їх груп з оброблюваними поверхнями за величинами тангенційних та нормальних сил. Визначається інтенсивність оброблення через суму активних швидкостей для точки оброблюваної поверхні за повний оберт оброблюваної деталі навколо власної осі. Ці розрахунки дозволили визначити що складові інтенсивності оброблення збільшуються при збільшенні кутових швидкостей. Звідси було запропоновано оптимальні кутові швидкості для оброблення БНТП та мітчиків. Ці дослідження дали деяке теоретичне підґрунтя для дослідження сил при обробленні деталей складних форм (БНТП та мітчики) при МАО в умовах великих магнітних зазорів, проте брак практичних досліджень зумовлює відсутність реальних безпосередніх значень сил [41, 44, 52, 64].

1.4 Висновки. Мета та задачі дослідження

1. Процес МАО характеризується 4 основними складовими: нормальною та тангенціальною складовими взаємодії деталі та МАІ, а також процесами формування стабільного МАІ та його рівномірними рухами.

2. В основі МАО лежать процеси та явища різної природи, які необхідно враховувати при дослідженні характеру формування МАІ.

3. В попередніх дослідженнях визначено, які фактори оброблення впливають на формування МАІ. Зокрема визначено вплив на МАО з боку

магнітного поля, магнітно-абразивного порошку, особливостей оброблюваної деталі, наявності ЗОТС та ПАР та ін.

4. Визначення реальних процесів та явищ, що зумовлюють формування МАІ прямо залежать від величини сил, що виникають при взаємодії між оброблюваною деталлю та МАІ. Тому важливою складовою вивчення МАІ є визначення реальних сил (тангенційних та нормальних) що виникають між деталлю та МАІ в процесі МАО.

5. Наявна інформація про сили, що виникають між оброблюваною деталлю та МАІ при МАО є недостатньою для повного розуміння процесу. Попередні дослідження носять, або суто теоретичний характер, або обмежені окремими випадками оброблення (наприклад оброблення в малих магнітних зазорах) тому необхідне суттєве розширення експериментальної бази з урахуванням великої кількості технологічних факторів оброблення, наприклад матеріалу, форми та розміру деталей, розміру та типу частинок МАІ, величини магнітної індукції, швидкостей оброблення та ін.

Мета роботи: Формування інструментального середовища при магнітно-абразивному обробленні в великих магнітних зазорах кільцевого типу, та дослідження явищ, які супроводжують процес оброблення з урахуванням впливу технологічних умов процесу, реологічних характеристик МАІ, розмірів, форми та матеріалу оброблюваних деталей.

Задачі:

1. Виконати аналіз наявної інформації про умови формування МАІ, особливості силової взаємодії з оброблюваними поверхнями, явища, що супроводжують процес контактної взаємодії при МАО, вплив реологічних властивостей МАІ і технологічних факторів на оброблення.

2. Розробити методику вимірювання реальних сил, які мають місце при взаємодії магнітно-абразивного інструменту з оброблюваними деталями та створити необхідне обладнання. Визначити необхідні для дослідження матеріали та форми зразків, порошки для формування МАІ.

3. Провести комплексні дослідження зміни тангенційної складової сил взаємодії оброблюваної деталі та МАІ. Визначити вплив технологічних факторів на оброблення.

4. Дослідити характер зміни нормальної складової сил, що мають місце при взаємодії оброблюваної деталі та МАІ в реальних умовах процесу МАО. Визначити вплив технологічних факторів на оброблення.

5. Встановити вплив властивостей матеріалу, розміру та форми деталей на характер силової взаємодії між оброблюваною деталлю та МАІ з урахуванням зміни технологічних факторів процесу оброблення.

6. Визначати вплив сил при МАО на характер видалення матеріалу та ефективність процесу. Розробити рекомендації по ефективному фінішному обробленню деталей методом МАО.

З урахуванням вищезазначеного було розроблено план дослідження, що наведений на рис. 1.13. Було запропоновано розглянути сили, що виникають між оброблюваною деталлю та МАІ при МАО через визначення реальних зусиль тангенційної та нормальної складової. Нормальну складову сили взаємодії МАІ та деталі слід розглянути в залежності від зміни форми та розмірів оброблюваної деталі. Отримані реальні значення сил, що виникають при взаємодії МАІ та деталі дозволять визначити реальні процеси та явища, які мають місце в МАІ, уточнити наявні механізми формування МАІ і отримати конкретну інформацію про сили, які діють в зонах оброблення реальних деталей, що є підґрунтям для формування технічних завдань при проектуванні обладнання. Також важливим є визначення впливу особливостей формування МАІ на характер видалення матеріалу з оброблюваної поверхні.



Рис. 1.13. План дослідження

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ОСОБЛИВОСТЕЙ ФОРМУВАННЯ МАГНІТНО-АБРАЗИВНОГО ІНСТРУМЕНТУ ПРИ МАО У ВЕЛИКИХ РОБОЧИХ ЗАЗОРАХ

У роботі проведено низку досліджень спрямовану на визначення особливостей формування МАІ при МАО через вимірювання реальних сил при взаємодії між оброблюваною деталлю та МАІ з урахуванням різних факторів впливу. Виконані серії експериментів зосереджених на зміні кожного окремого фактору для визначення його впливу на сили при МАО. Ці експерименти можна об'єднати в дві основні групи: дослідження тангенційної взаємодії з обертанням зразків навколо власної осі та дослідження сил опору руху деталі з боку МАІ (нормальні сили) без додаткового обертання зразків. Нижче описано методи обладнання та інструменти, що використовувалися у всіх серіях експериментів.

2.1 Обладнання для проведення досліджень

Дослідження процесу МАО були проведені за схемою кільцевої ванни з великим магнітним зазором, це зумовлено можливістю оброблення деталей широкої номенклатури форм та розмірів. Для проведення експериментів було використано модифікований вертикально-фрезерний верстат типу ОЦ – Іжевськ з коаксіальною магнітною системою і кільцевою магнітною робочою зоною. На рисунку 2.1 зображено установку, що складається з магнітної системи (1) на якій знаходиться кільцева робоча зона (2). На головному шпинделі верстата (3) знаходиться базова плита (4) на якій може закріплюються низка пристосувань для закріплення деталей (5) та зчитування інформації. Робоча зона містить у собі МАІ (6), що розташований у кільцевому проміжку між полюсних наконечників (7). Кільцева магнітна ванна з параметрами (середній діаметр – 200 мм, висота – 30 мм, ширина – 35 мм) дозволяє оброблення в умовах великих магнітних зазорів деталей відповідних розмірів без обмеження за формою. Магнітна система дозволяє

створювати магнітне поле з індукцією 0,05 – 0,3 Тл. Швидкість обертання головного шпинделя верстата може плавно варіюватися у межах 50 – 500 об/хв [3, 36, 39, 56, 65, 66].

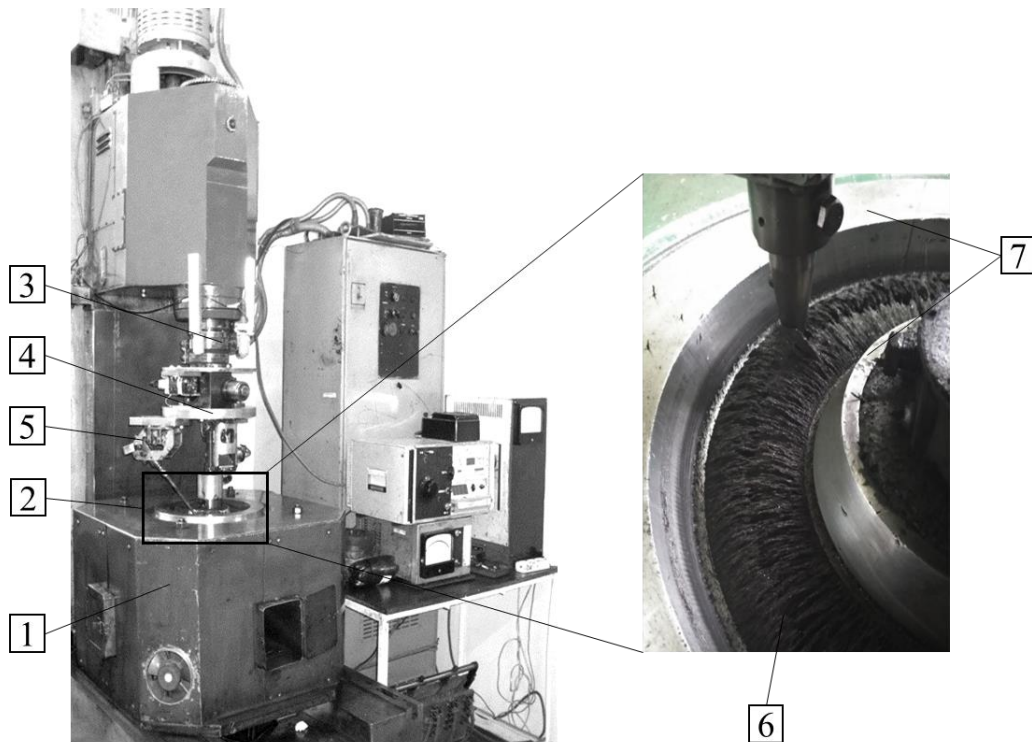


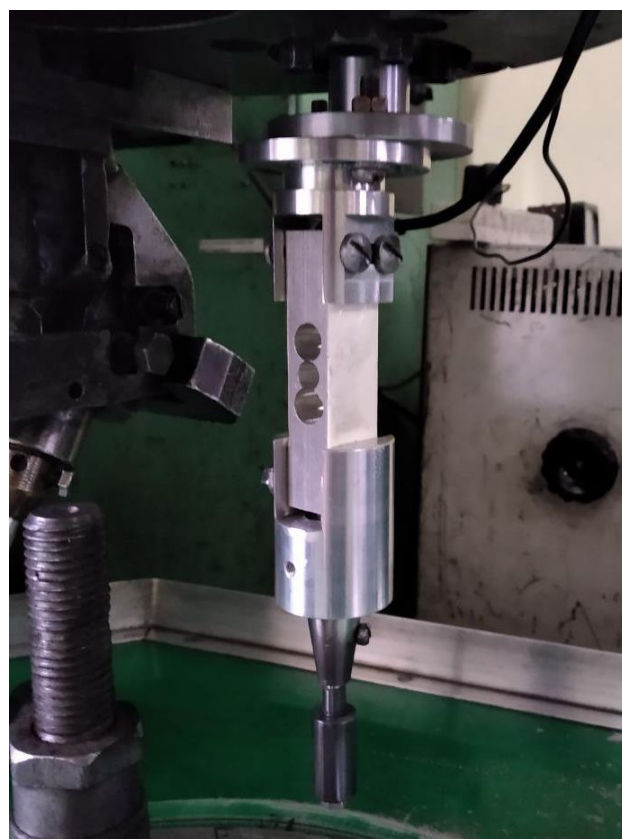
Рис. 2.1. Дослідна установка для MAO [3, 36]

В дослідженнях було використано 2 варіанта базування деталі в робочій зоні. В перших дослідженнях, спрямованих на визначення тангенційної взаємодії, було використано пристосування з мінішпинделем зображене на рис 2.2 а. Це пристосування дозволяє обертати деталь відносно своєї осі на швидкості 100 – 800 об/хв, також існує можливість повороту кута нахилу деталі на 0 – 80° (в експериментах деталі були встановлені паралельно до основної осі обертання верстата). З двигуна цього пристосування можливо зчитувати значення сили струму та регулювати значення напруги та швидкості обертання [3, 36, 39]. Дослідження сили опору зі сторони МАІ при MAO проводилися за допомогою пристосування зображеного на рис 2.2 б, що представляє собою динамометричну балку, що діє на згин. Основою цього пристосування є тензометричний датчик згин якого, під дією сил опору, створює електричний сигнал, що потім опрацьовується АЦП та видається у вигляді значення у грамах. Тензометричний датчик аналогічний датчикам, що використовують в

електронних вагах та розрахований на навантаження до 200 Н. Для закріплення динамометричної балки з тензометричним датчиком на основній несучій плиті було розроблено спеціальне пристосування, що дозволяло налаштовувати положення датчика з деталлю в робочій зоні між полюсними наконечниками магнітної системи установки. Пристосування можна як повертати навколо осі деталі, так і переміщувати в радіальному напрямку відносно осі верстата.



а



б

Рис. 2.2. Пристосування для закріплення деталі

Для зчитування сигналу та його перетворення в цифровий формат було використано АПЦ на базі ARDUINO Nano, що розташовувалися на базовій плиті верстата. З цього пристосування сигнал міг передаватися на ПК за допомогою безпроводного зв'язку.

2.2 Зразки для дослідження величини сил при МАО

Для дослідження тангенційної взаємодії використовувалися циліндричні зразки діаметром 16 мм та висотою 30 мм (відповідає висоті робочої зони) (рис.2.3). Матеріалами зразків були сталь 40X13, алюмінієвий сплав Д16,

титановий сплав ВТ8 та бронза БрОц. Такі матеріали були обрані через їх магнітні властивості: сталь – феромагнетик, титан та алюміній – парамагнетики, бронза – діамагнетик.

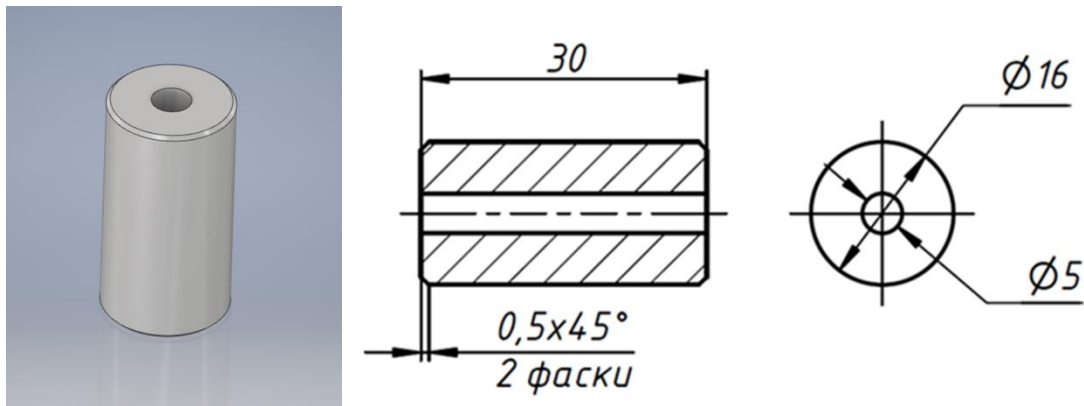


Рис. 2.3. Вигляд зразків, що використовувалися в дослідженні нормальних і тангенціальних сил

Такі самі зразки використовувалися для дослідження нормальної взаємодії для визначення коефіцієнтів тертя.

Також для визначення особливостей формування МАІ через дослідження сили опору було використано призматичні зразки різного розміру та різної форми (рис. 2.4). Для дослідження впливу розміру деталі на формування МАІ було використано зразки діаметру 8, 12 та 16 мм (рис. 2.4 а), для дослідження впливу форми деталі було використано циліндричні трикутні та квадратні зразки (рис. 2.4 б).



а



б

Рис. 2.4. Зразки для дослідження впливу розміру – а, та форми – б деталі на характер формування МАІ

2.3 Методи досліджень взаємодії між МАІ і оброблюваною поверхнею зразків

2.3.1 Метод дослідження тангенціальної складової сил взаємодії між МАІ і оброблюваною поверхнею зразків.

Для визначення тангенціальних сил що діють на деталь зі сторони МАІ при МАО був використаний опосередкований метод. Суть методу полягає у визначенні ефективного моменту опору двигуна мінішпинделя, що обертає деталь навколо власної осі. Для цього під час процесу МАО вимірювались напруга, сила струму на двигуні мінішпинделя та швидкість обертання деталі. Для відокремлення сил, викликаних процесом оброблення від енергетичних втрат викликаних сторонніми факторами, необхідно було визначити опір двигуна та момент холостого ходу. На початку було знайдено опір двигуна, для цього при загальмованому якорі послідовно змінюючи величину напруги вимірювали величину струму, що подається на двигун мінішпинделя. Опір двигуна розраховувався за формулою (2.1).

$$r_{\text{дв}} = \frac{U_{\text{дв}}}{I_{\text{дв}}} \quad (2.1)$$

Де $r_{\text{дв}}$ – опір двигуна (Ом), $U_{\text{дв}}$ – напруга, що подається на двигун (В), $I_{\text{дв}}$ – сила струму (А). Результати вимірювання показані на рис. 2.5

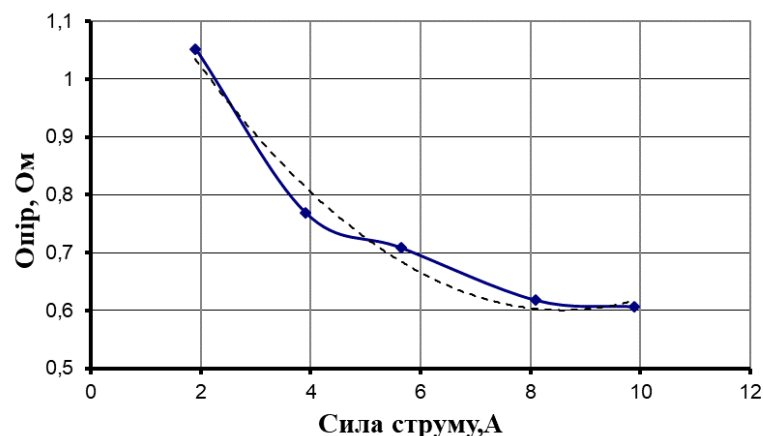


Рис. 2.5. Значення опору двигуна в залежності від сили струму

Наступним кроком було тарування обладнання шляхом руху зразка (обертання відносно осі головного шпинделя та обертання відносно своєї осі) в

робочій зоні вільній від МАП. Вимірювалася сила струму та швидкість обертання зразку навколо своєї осі, що задавалися зміною напруги двигуна мінішпинделя. Момент розраховувався за формулою 2.2.

$$M_{x.x.} = \frac{U_{xx} \cdot I_{xx} - I_{xx}^2 \cdot r_{дв.}}{\omega} \quad (2.2)$$

Де M_{xx} – момент холостого ходу, U_{xx} – напруга холостого ходу (В), I_{xx} – сила струму холостого ходу (А), $r_{дв.}$ – опір двигуна (Ом), ω – швидкість обертання зразка (об/хв). Розраховані значення моменту холостого ходу представлені апроксимуючою лінійною функцією залежності моменту холостого ходу від швидкості обертання зразку навколо власної осі (рис. 2.6).

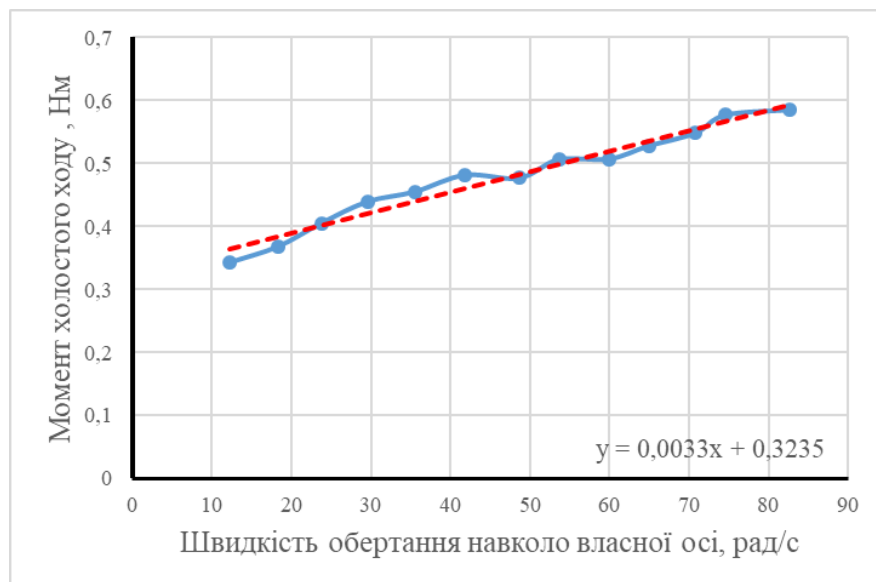


Рис. 2.6. Значення моменту холостого ходу в залежності від швидкості обертання зразку навколо власної осі.

Після визначення опору двигуна та моменту холостого ходу було проведено експеримент з обробленням зразків з використанням МАІ, в ході якого було вираховано робочий момент двигуна за аналогічною методикою до визначення моменту холостого ходу за формулою 2.3

$$M_{дв} = \frac{U_{роб} \cdot I_{роб} - I_{роб}^2 \cdot r_{дв.}}{\omega} \quad (2.3)$$

Де $M_{дв}$ – робочий момент, $U_{роб}$ – робоча напруга, $I_{роб}$ – робоча сила струму, $r_{дв.}$ – опір двигуна (Ом), ω – швидкість обертання зразка (об/хв). Дійсне

значення сил оброблення виражене у ефективному моменті з відокремленими сторонніми факторами (опір двигуна та момент холостого ходу) визначалося за формулою 2.4.

$$M_{\text{еф}} = M_{\text{дв}} - M_{\text{хх}} \quad (2.4)$$

2.3.2 Метод дослідження нормальної складової сил взаємодії між МАІ і оброблюваною поверхнею зразків

Визначення нормальних сил, тобто сил опору руху деталі зі сторони МАІ при MAO велося безпосереднім методом за допомогою пристосування з тензодатчиком. Суть методу схематично показана на рис 2.7 МАІ (1) створює тиск на деталь (2) перешкоджаючи її руху в робочій зоні в робочій зоні під час MAO. Тензодатчик (3) сприймає це навантаження, згин датчика викликає електричний сигнал. Тензодатчик та деталь закріплені через спеціально розроблене пристосування (4).

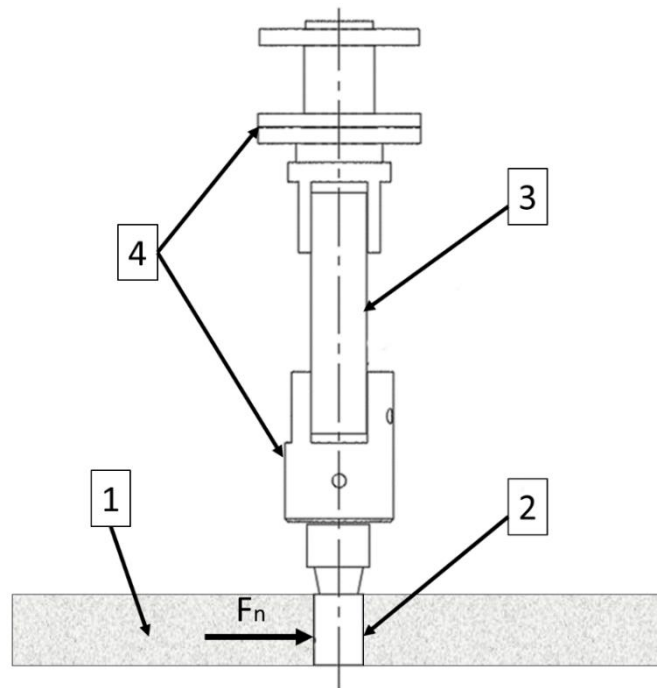


Рис. 2.7. Схема роботи пристосування з тензодатчиком.

Сигнал викликаний згином тензодатчика поступає на АПЩ, що розташований на базовій плиті верстата (рис. 2.1.). Тут сигнал зчитується з частотою 10 Гц, перетворюється у цифрове значення у грамах та через

Bluetooth передається до персонального комп'ютера (ПК) (рис. 2.8). Тензодатчик був тарований в зібраному та налаштованому пристосуванні за допомогою динамометра. Тривалість кожного експерименту становила близько 30 секунд, що дозволяло отримувати не менше 300 значень діючих сил, з яких визначалося середнє значення.

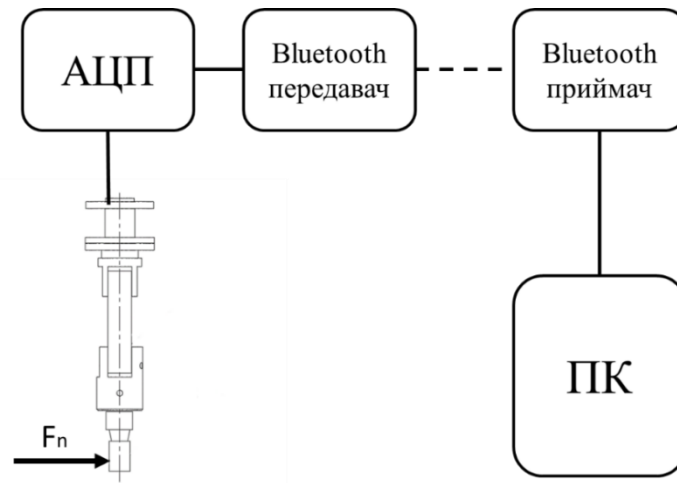


Рис. 2.8. Схема роботи пристосування з тензодатчиком

2.3.3 Метод вимірювання локальної індукції магнітного поля

Для вимірювання локальних значень магнітного поля в пустому робочому зазорі (відсутність МАП) було використано метод описаний в роботі [36]. Для цього застосовували мілітеслометр Ф 4355 з датчиком на основі ефекту Холла. Вимірювання виконували в 35 точках робочого зазору за схемою показаною на рис 2.9 для феромагнітної та діамагнітної деталі.

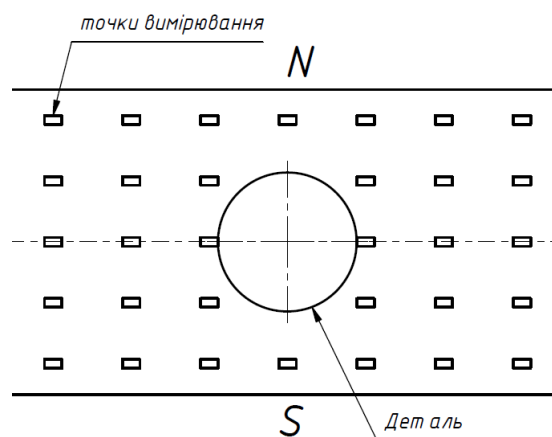


Рис. 2.9. Схема вимірювання магнітної індукції в магнітному зазорі

2.3.4 Метод дослідження інтенсивності видалення матеріалу при МАО

В роботі також було досліджено характер інтенсивності видалення матеріалу з оброблюваної поверхні. Критерієм інтенсивності оброблення було обрано величину заокруглення кромки деталі. Зразками, на яких вимірювалися радіуси заокруглення були феромагнітні квадратні пластини висотою 5 мм та з різним розміром сторони квадрату (8, 12, 20 мм).

Вимірювання форми кромки деталі було виконано на профілометрі за методом «зіскоку» щупа (рис. 2.8) описаному в роботі [67]. Суть методу полягала в тому, що підпружинена голка профілометра малого радіусу округлення має можливість лінійно рухатися вертикально та горизонтально тим самим описуючи профіль заокругленої кромки. Радіуси вимірювалися в трьох площинах вздовж кромки.

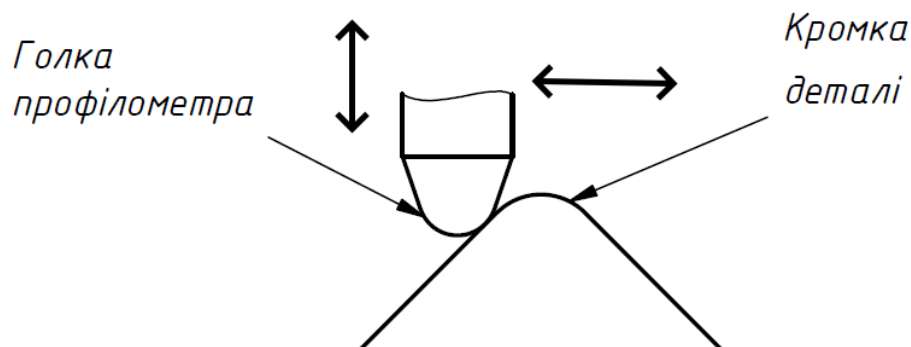


Рис. 2.8. Схема вимірювання радіусів заокруглення на профілометрі

За схемою викладеною [67] лінійні рухи голки перетворювалися в електричні сигнали за допомогою датчика на профілометрі. Сигнал через блок спряження поступає на АЦП встановлений в блоці ПК рис. 2.9. Потім данні отримані з профілометра були оброблені в середовищі MathCad за методикою викладеною в [67, 68], що дала можливість визначити радіус кола вписаного в профіль кромки. Суть метода полягає у тому, що при обробці результатів визначаються прямолінійні та криволінійні ділянки профілю, далі вираховується діаметр вписаного в профіль кола, що і визначає радіус

заокруглення кромки [67, 68]. Загальний час оброблення зразків складав 12 хвилин, проміжні вимірювання кромки виконувалися кожні 3 хвилини.

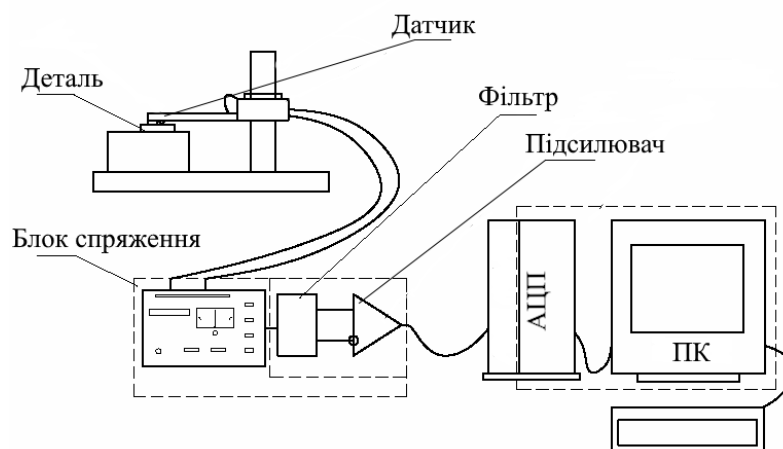
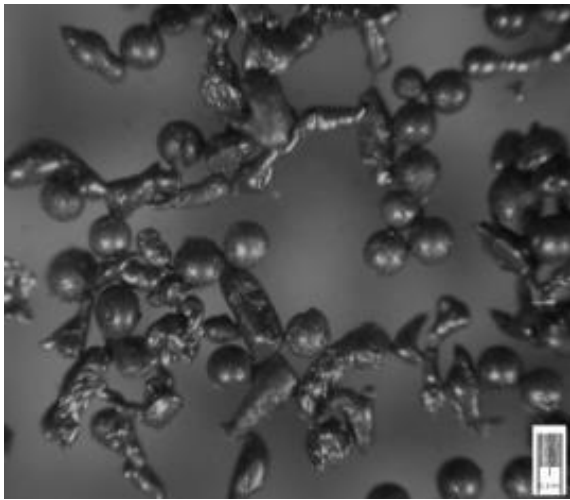


Рис. 2.9. Блок-схема для вимірювання радіусів заокруглення кромки [67]

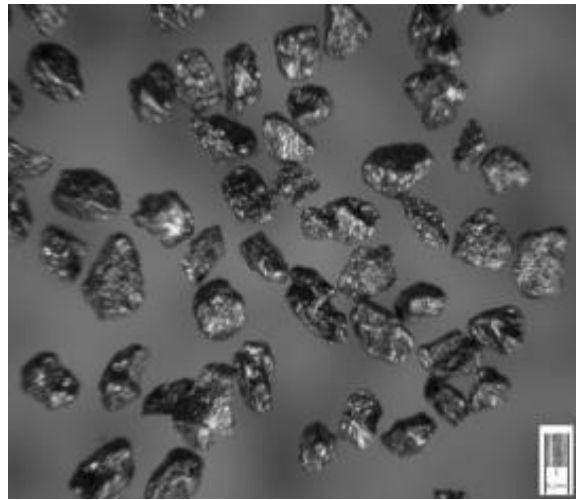
2.4 Магнітно-абразивні порошки, що використовувалися в дослідженні при формуванні МАІ

Для формування МАІ використовують низку різновидів магнітно-абразивних порошків (МАП) з різними властивостями та особливостями роботи. Матеріал, форма та розмір зерен порошку мають прямий вплив на характер МАО та силові характеристики при МАО, тому в такому дослідженні необхідно використовувати декілька типів МАП, що будуть мати різні властивості. Для досліджень було обрано два типи МАП округлий Полімам-М та оскольчастий Полімам-Т. Такий вибір зумовлений різною взаємодією цих порошків з деталлю, так оскольчастий порошок переважно видаляє матеріал з поверхні оброблюваної шляхом мікрорізання поверхні. Натомість, округлий порошок крім мікрорізання має тенденцію до створення пластичної деформації оброблюваних поверхонь шляхом наклепу, вигладжування, обкатування і т. і. Ще однією відмінною характеристикою між цими типами порошків є магнітні характеристики, а саме магнітна проникливість. Так порошок Полімам-М має більшу магнітну проникливість (1,63 Тл проти 1,49 Тл) ніж порошок Полімам-Т [2], що впливає на поведінку МАІ в магнітному зазорі. Також для дослідження було обрано дві різні фракції 200/100 мкм та 400/315 мкм для кожного типу порошку. Варіативність фракцій порошку існує для визначення характеру

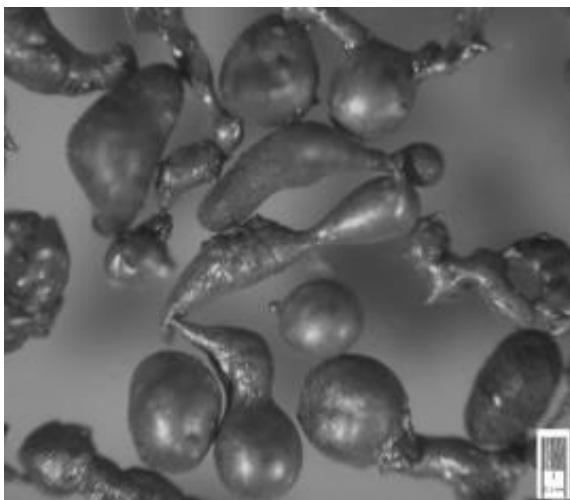
поведінки зерен порошку при МАО та визначення явищ заклинювання порошку в магнітному зазорі. Такий вибір марок та розміру МАП дозволив врахувати та розглянути відразу декілька важливих факторів, що впливають на силові характеристики при МАО. Фотографії фракцій порошоків, що використовувалися в експерименті для формування МАІ рис 2.10, показує значну різницю форми між округлими (рис. 2.10 а, в) та оскольчастими (рис. 2.10 б, г) порошками, що суттєво впливають на характер оброблення та, як наслідок, силову взаємодію між МАП та оброблюваною деталлю.



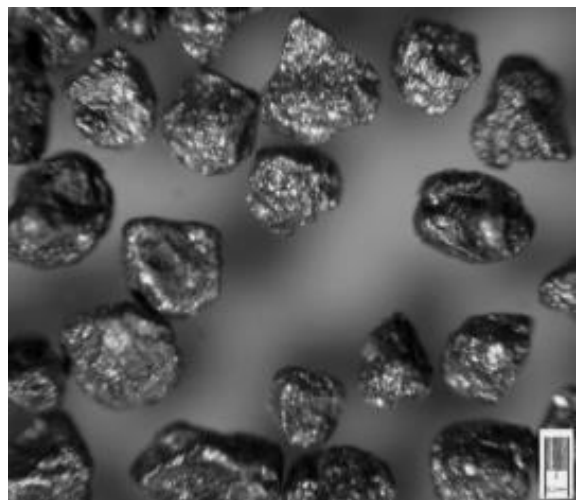
а



б



в



г

Рис. 2.10. МАП, що використовувалися в дослідженнях а – Полімам-М 200/100 мкм, б – Полімам-Т 200/100 мкм, в – Полімам-М 400/315 мкм, г – Полімам-Т 400/315 мкм [3]

Варто також зазначити, що ці порошки є рівновісними тобто відношення між довжиною та шириною частинки (k_f) порошку не більше ніж 1,6.

2.5 Пристосування для забезпечення умов формування стабільного МАІ при МАО в кільцевій ванні

Для стабілізації МАІ в робочій зоні було використано відновлювальний стержневий елемент (ВСЕ) з немагнітного матеріалу. Дослідження [36, 64] показують, що рух деталі в кільцевій ванні створює витіснення об'ємів МАІ за межі робочої зони. Від просторової орієнтації деталі залежить напрямок витіснення МАІ, утворюючи режими «натікання» і «стікання». ВСЕ застосовується для повернення витіснених об'ємів МАІ шляхом орієнтації елемента у протилежну сторону відносно оброблювальної деталі [36, 64, 69, 70, 80]. На рисунку 2.11 показано схематичне представлення роботи ВСЕ в режимі «натікання». Оброблення деталі, що розташовувалася паралельно до осі кільцевої ванни. Варто зазначити, що не мав впливу на зчитування значень сил оскільки прилади, що зчитували навантаження розташовувалися безпосередньо в пристроях закріплення та обертання зразків, тобто ВСЕ не впливав на показання приладів зчитування.

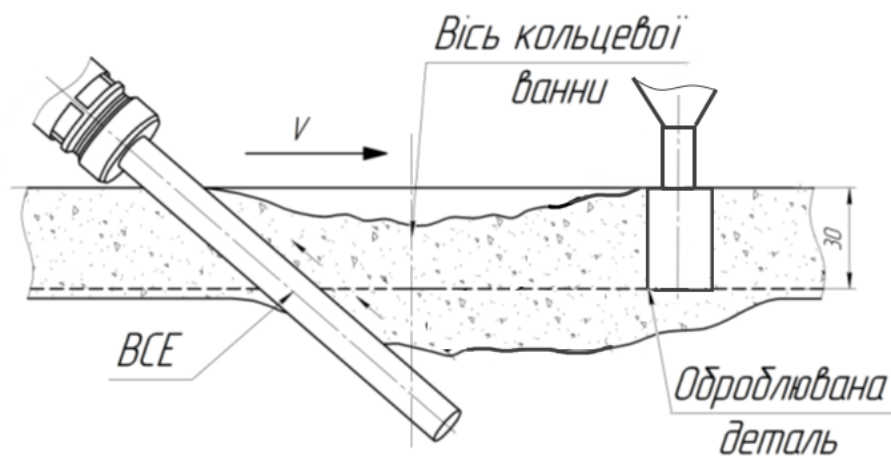


Рис. 2.11. Схематичне зображення роботи ВСЕ [3, 36, 70]

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ТАНГЕНЦІАЛЬНОЇ ТА НОРМАЛЬНОЇ СКЛАДОВИХ СИЛ ПРИ МАО

Для визначення тангенціальної та нормальної складових сил при МАО було використано методики викладені у розділі 2. Параметром, що визначає тангенціальну взаємодію деталі та МАІ при МАО було обрано величину ефективного моменту тертя, який виникає на двигуні мінішпинделя при обертанні деталі під час МАО. Зразками, що брали участь в експерименті були циліндричні деталі діаметром 16 мм та висотою 30 мм зображені на рисунку 2.3. Зразки виконані з бронзового сплаву БраЖ, сплаву алюмінію Д16, титану ВТ8 та Сталі 40Х13. Матеріали деталей були обрані з огляду на феро- та парамагнітні властивості матеріалів, а також на триботехнічні властивості матеріалу.

Швидкість руху зразків в робочій зоні складала 1 – 3 м/с, Швидкість обертання зразків навколо своєї осі 0-80 рад/с. Індукція магнітного поля становила 0,18 та 0,25 Тл.

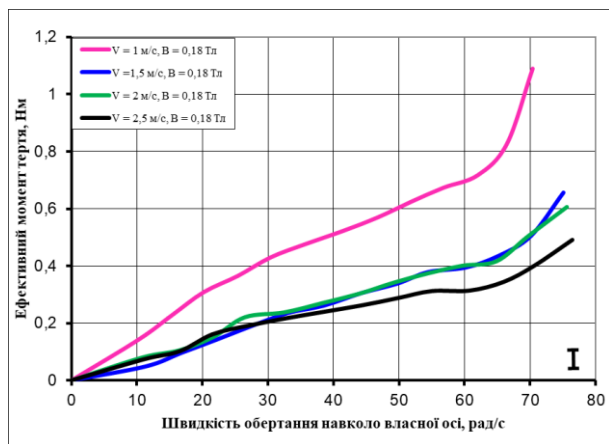
3.1 Вплив технологічних параметрів процесу МАО на сили тертя в парі МАІ-поверхня деталі

3.1.1 Дослідження ефективного моменту, що має місце при терті в процесі оброблення феромагнітної деталі

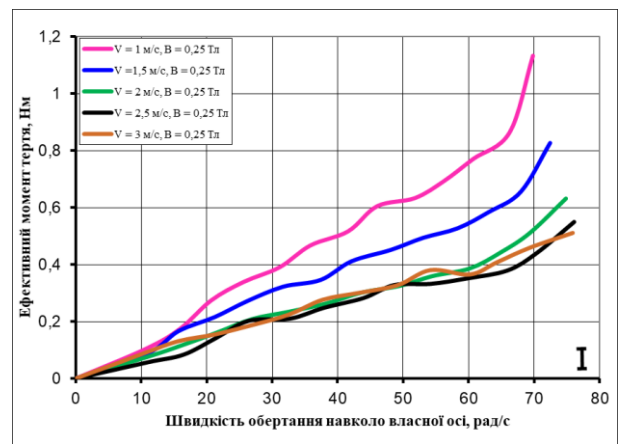
Результати експериментальних досліджень при обробленні деталей з феромагнітного матеріалу наведені у вигляді залежностей зміни величини моменту, що має місце при терті в парі МАІ-поверхня деталі від швидкостей оброблення на рис. 3.1 при обробленні порошком Полімам-Т та рис. 3.2 при обробленні порошком Полімам-М. Визначено, що ефективний момент зростає зі зростанням швидкості обертання деталі навколо своєї осі, цю залежність можна поділити на 3 основні зони:

- 1 зона (0 – 10 рад/с) зона стрімкого зростання величини моменту, пов'язана з процесом активного формування квазістабільного та структурованого МАІ,

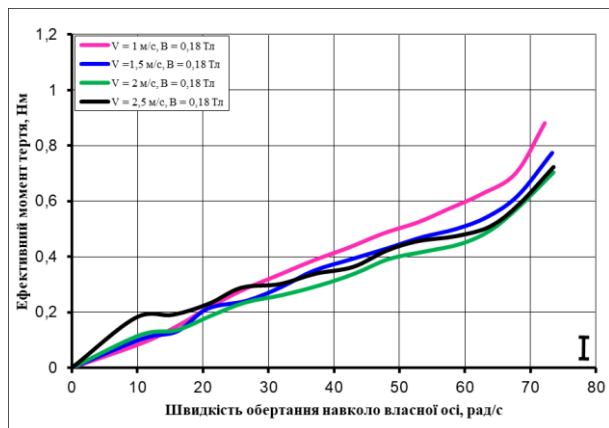
- 2 зона (10 – 65 рад/с) зона лінійного зростання ефективного моменту, що зумовлена стабільно сформованим МАІ,
- 3 зона (більше 65 рад/с) зона різкого зростання моменту, яка пов'язана з активним перемішуванням частинок МАП та руйнуванням (переформуванням) квазістабільних формувань МАІ [71]. Визначено, що зменшення величини швидкості руху в робочій зоні зумовлює збільшення ефективного моменту тертя. Це пояснюється переважаючим фактором швидкості обертання навколо власної осі на ефективний момент.



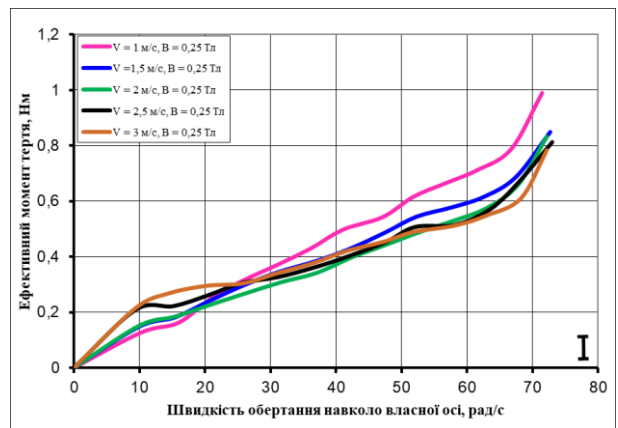
а



б



в



г

Рис. 3.1. Величина ефективного моменту при МАО ферромагнітної деталі в залежності від швидкостей руху в робочій зоні та навколо власної осі при використанні порошку Поліам-Т з зернистістю 200/100 (а, б) та 400/315 мкм (в, г), Величина магнітної індукції 0,18 (а, в) та 0,25 Тл (б, г).

Досліджено вплив марки порошку та розміру його частинок на зміну ефективного моменту тертя. Оброблення з використанням порошку Полімам-М супроводжується суттєво більшими значеннями ефективного моменту ніж при використанні порошку Полімам-Т. Це зумовлено особливостями взаємодії округлих та оскольчастих порошоків з поверхнею деталі, тобто більший ступінь щільності частинок порошку та більша площа контакту округлого порошку з поверхнею деталі створюють більшу силу тертя при обробленні порошком Полімам-М ніж порошком Полімам-Т [2].

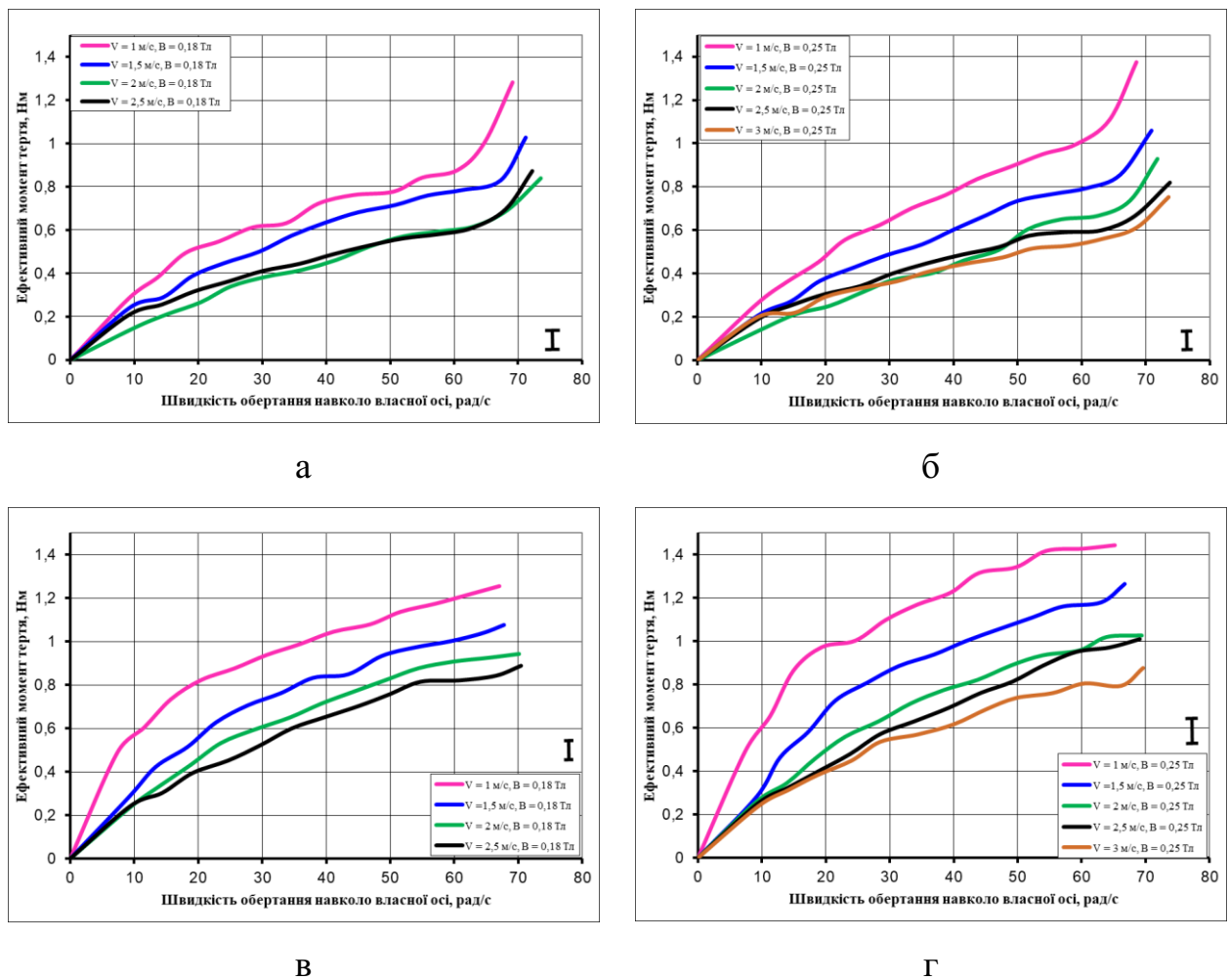


Рис. 3.2. Величина ефективного моменту при МАО ферромагнітної деталі в залежності від швидкостей руху в робочій зоні та навколо власної осі при використанні порошку Полімам-М з зернистістю 200/100 (а, б) та 400/315 мкм (в, г), Величина магнітної індукції 0,18 (а, в) та 0,25 Тл (б, г).

Для порошоків Поліам-М збільшення розміру частинок порошку призводить до збільшення ефективного моменту тертя на 30 – 80 %, а для порошоків марки Поліам-Т різниця становить 0 – 40 %.

Визначено, що зміна величини магнітної індукції в досліджуваному діапазоні не має суттєвого впливу на величину ефективного моменту тертя. Так зміна індукції з 0,18 до 0,25 Тл призводить до зміни величини моменту не більше 10 %. Це вказує на переважний характер умов, пов'язаних з динамічною взаємодією феромагнітної деталі та МАІ.

Ефективний момент тертя при МАО феромагнітної деталі для даного діапазону швидкостей становить не більше 1,2 – 1,4 Нм.

3.1.2 Дослідження ефективного моменту, що має місце при терті в процесі оброблення пара- та діамагнітних деталей

Наступним етапом було дослідження зміни величини ефективного моменту тертя в парі МАІ-поверхня деталі при обробленні немагнітних матеріалів. На рис. 3.3 показано залежності зміни величини моменту тертя від швидкостей оброблення при обробленні деталі з бронзи БраЖ. Визначено, що ефективний момент тертя не перевищує 0,7 – 0,9 Нм. Показано, що наведені графіки залежностей також, як і при обробленні феромагнітної деталі мають 3 зони, проте ці зони не настільки яскраво виражені, як в попередніх дослідженнях. Встановлено, що при обробленні порошком Поліам-М зі швидкістю більше 65 рад/с виникає зниження величини моменту, а при обробленні порошком Поліам-Т – присутнє зростання моменту. Таке явище може бути пов'язано з ускладненим перемішуванням (заклинюванням) порошку осколької форми (Поліам-Т), та, як наслідок, стрімким зростанням сил. Так само, як і при обробленні сталеві деталі, при обробленні деталі з бронзи присутнє збільшення ефективного моменту тертя при зменшенні величини швидкості руху в робочій зоні. Зміна величини магнітної індукції має певний вплив у порівнянні з результатами оброблення магнітної деталі. Так збільшення величини магнітної індукції з 0,18 до 0,25 Тл приводить до збільшення величини ефективного моменту на 10 – 30 %. Це зумовлено тим, що

при обробленні феромагнітних деталей концентратором поля є сама деталь, тому зміна магнітної індукції робочої зони не має суттєвого впливу на величину моменту. Натомість при обробленні немагнітної деталі жорсткість МАІ та, як наслідок, величина ефективного моменту, прямо залежать від величини магнітного поля в робочій зоні.

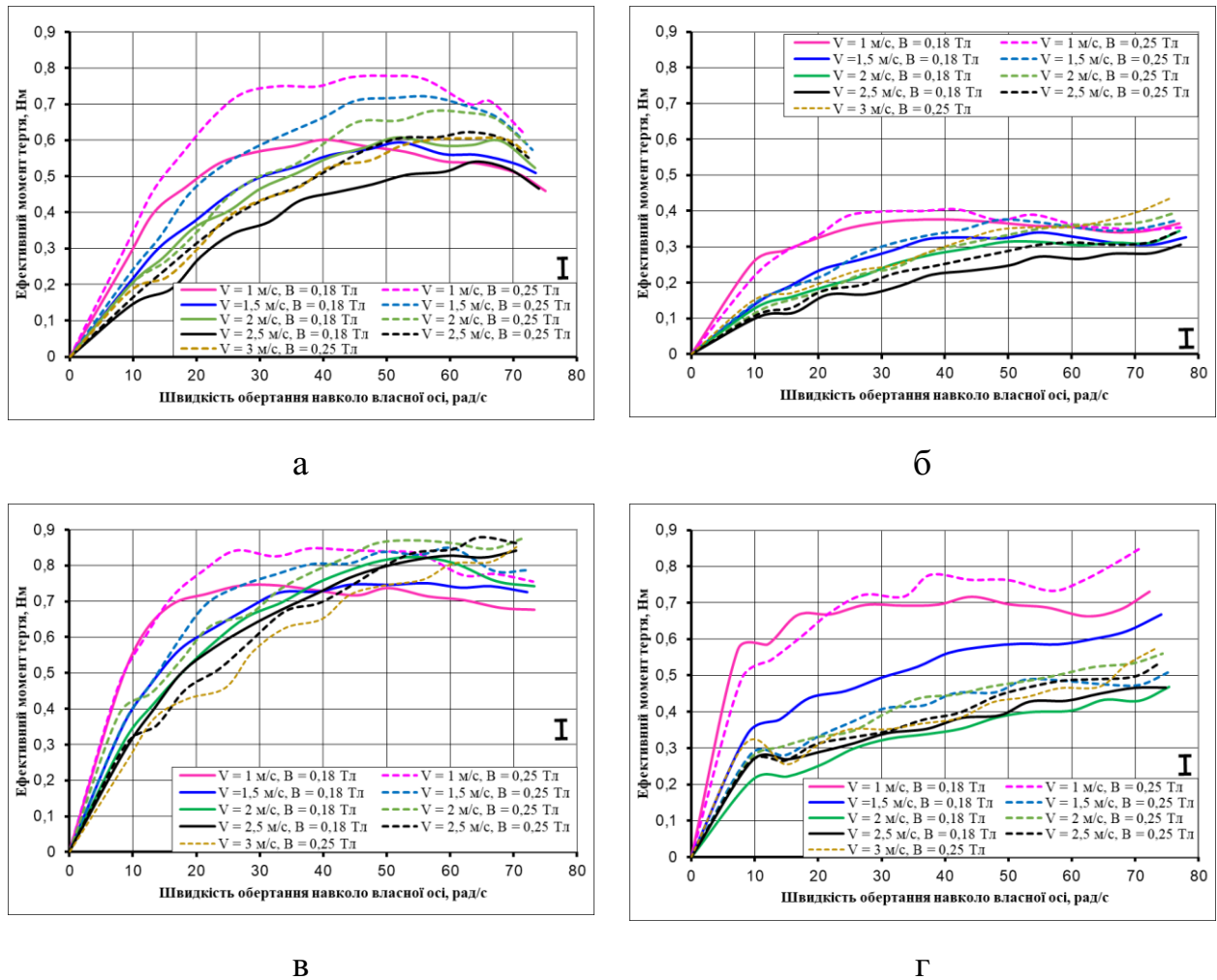


Рис. 3.3. Величина ефективного моменту при МАО деталі зі сплаву бронзи БраЖ в залежності від швидкостей руху в робочій зоні та навколо власної осі при використанні порошку Поліам-М (а, в) та Поліам-Т (б, г) з зернистістю 200/100 (а, б) та 400/315 мкм (в, г), Величина магнітної індукції 0,18 та 0,25 Тл.

Встановлено, що для порошків Поліам-М збільшення розміру частинок порошку призводить до збільшення значення ефективного моменту тертя на 10 – 70%, а для порошків марки Поліам-Т різниця становить 20 – 100 % (найбільша різниця присутня при малих швидкостях оброблення).

На рисунку 3.4 показано графіки залежності зміни величини ефективного моменту тертя від швидкостей оброблення при МАО деталі зі сплаву титану ВТ8. Визначено аналогічні до оброблення бронзи характер зміни ефективного моменту при швидкостях обертання деталі навколо власної осі більше 65 рад/с. А саме при обробленні порошком Полімам-М присутнє спадання моменту, при обробленні порошком Полімам-Т – зростання. Встановлено, що при обробленні титанової деталі збільшення величини магнітної індукції з 0,18 до 0,25 Тл приводить до збільшення величини ефективного моменту на 10 – 40 %, що подібно до результатів отриманих при обробленні бронзи.

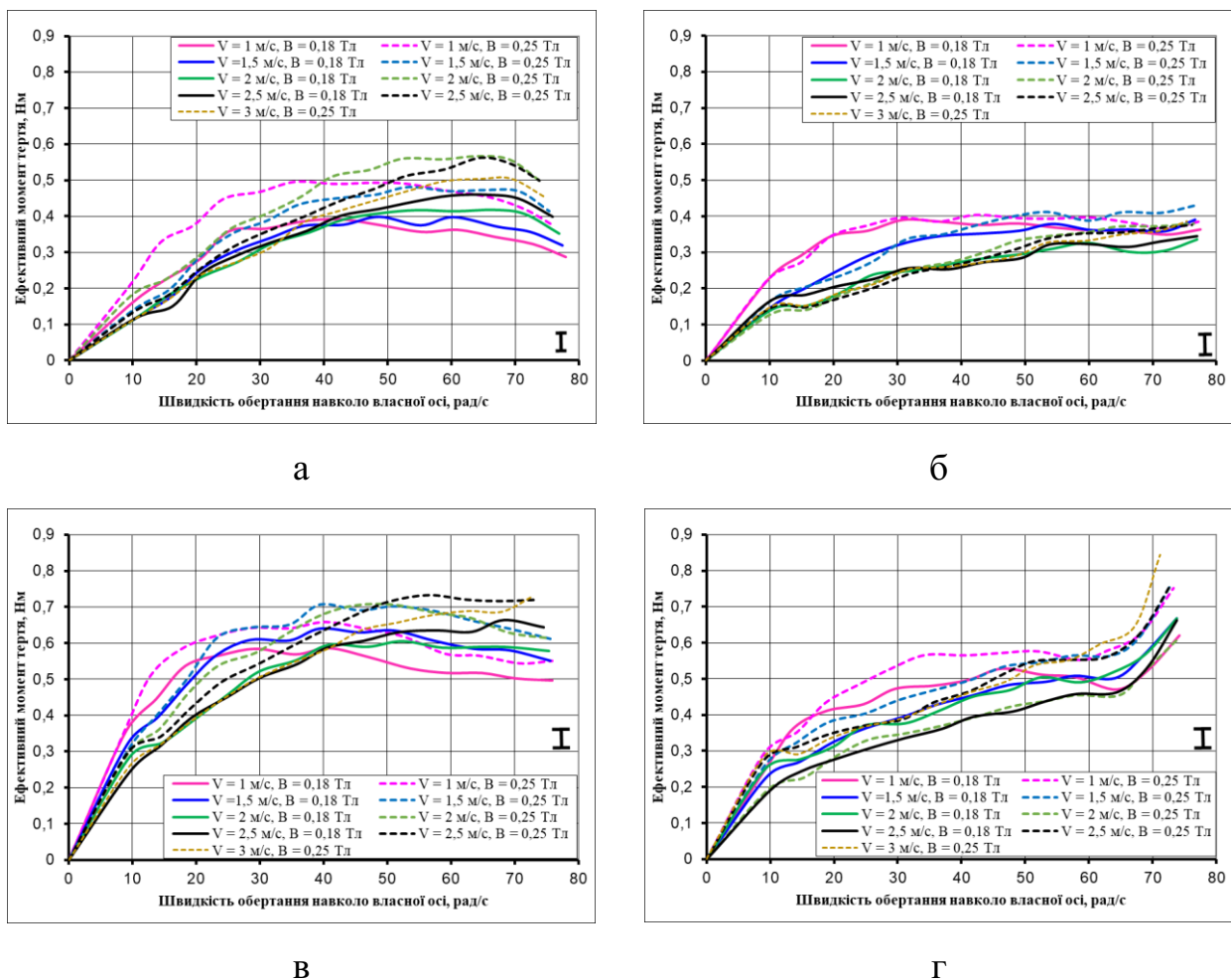


Рис. 3.4. Величина ефективного моменту при МАО деталі зі сплаву титану ВТ8 в залежності від швидкостей руху в робочій зоні та навколо власної осі при використанні порошку Полімам-М (а, в) та Полімам-Т (б, г) з зернистістю 200/100 (а, б) та 400/315 мкм (в, г), Величина магнітної індукції 0,18 та 0,25 Тл.

Аналогічно до результатів оброблення сталі та бронзи, при обробленні титанової деталі ефективний момент тертя більший при використанні порошку Полімам-М ніж при використанні порошку Полімам-Т. Це пов'язано з відмінностями в характері оброблення порошками різних форм. Визначено, що збільшення розміру частинок порошку з 200/100 до 400/315 мкм призводить до збільшення значення ефективного моменту тертя на 30 – 80 %. Варто зазначити, що загалом ефективний момент тертя при обробленні титанової деталі становить не більше 0,7 – 0,8 Нм.

На рисунку 3.4 показано графіки залежності ефективного моменту тертя від швидкостей оброблення при обробленні деталі зі сплаву алюмінію Д16. Визначено, що ефективний момент тертя при обробленні деталі з алюмінію становить не більше 0,5 – 0,8 Нм. Графіки залежності ефективного моменту при обробленні алюмінію характеризується чітким поділом на зони різкого зростання (до 20 рад/с), стабільного руху (20 – 65 рад/с) та зростання (при використанні Полімам-Т) та спадання (Полімам-М) при високих швидкостях обертання деталі навколо своєї осі. Встановлено, що при обробленні деталі з алюмінію збільшення величини магнітної індукції з 0,18 до 0,25 Тл приводить до збільшення величини ефективного моменту на 10 – 30 %, що схоже до результатів отриманих при обробленні бронзи та титану.

Зміна марки порошку має суттєвий вплив в залежності до розміру частинок. Так при зернистості 200/100 мкм ефективний момент є більшим при обробленні порошком Полімам-М. Проте для порошоків з більшим розміром частинок (400/315 мкм) більші значення моменту притаманні обробленню з використанням порошку Полімам-Т. Особливо це проявляється при швидкостях обертання деталі навколо своєї осі більше 60 рад/с. Це пояснюється інтенсифікацією процесів заклинювання порошку при використанні МАП з крупними осколькочастими частинами. Варто зазначити, що збільшення розміру частинок порошку Полімам-Т з 200/100 до 400/315 мкм призводить до збільшення значення ефективного моменту тертя на 30 – 80 %. Натомість при

збільшенні частинок порошку Полімам-М відбувається зменшення величини ефективного тертя на 20%.

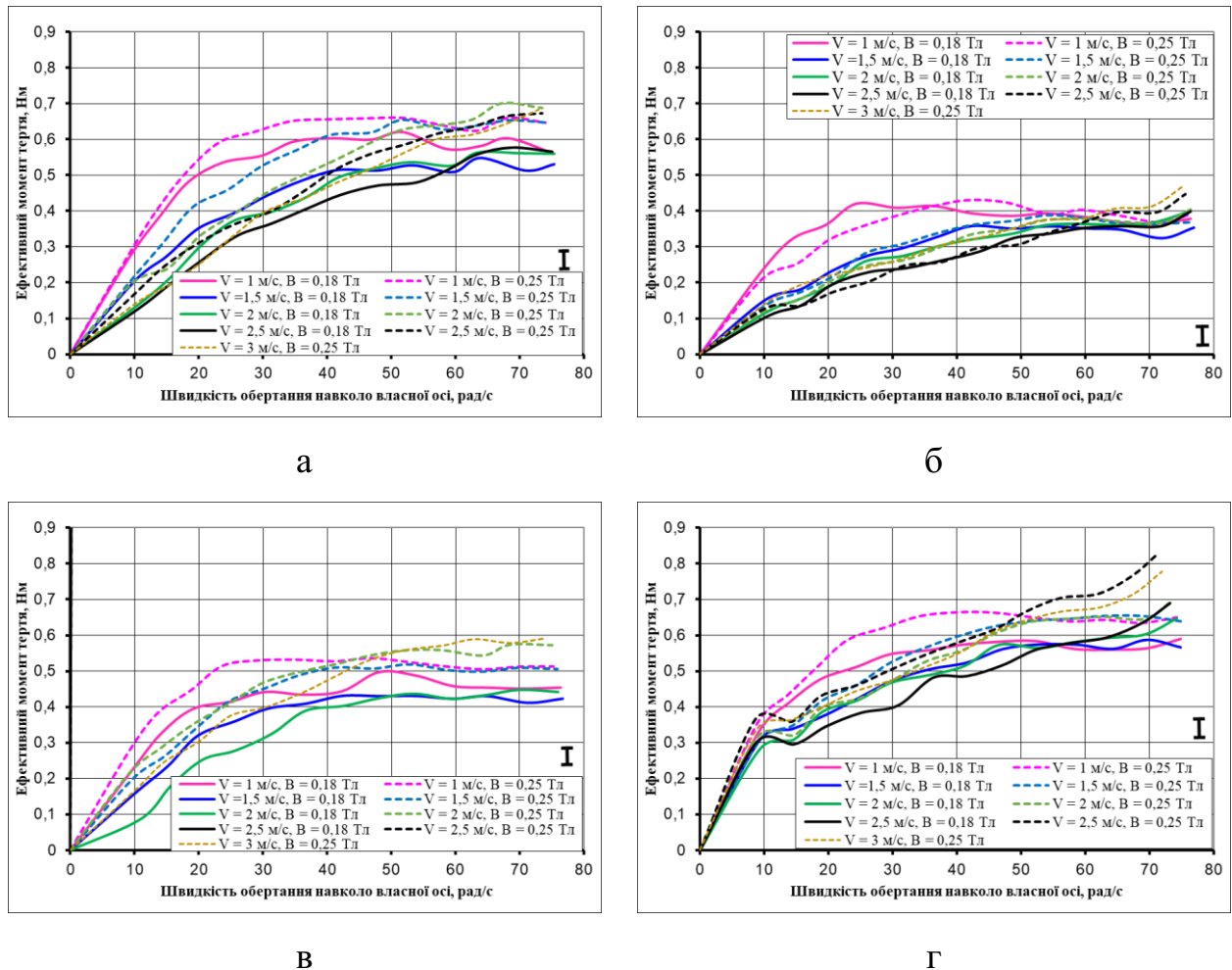
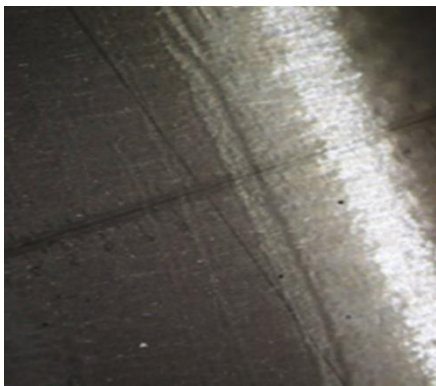


Рис. 3.5. Величина ефективного моменту при МАО деталі зі сплаву алюмінію Д16 в залежності від швидкостей руху в робочій зоні та навколо власної осі при використанні порошку Полімам-М (а, в) та Полімам-Т (б, г) з зернистістю 200/100 (а, б) та 400/315 мкм (в, г), Величина магнітної індукції 0,18 та 0,25 Тл.

З'ясовано, що серед немагнітних матеріалів найбільший ефективний момент тертя має бронза, що зумовлено триботехнічними властивостями цього матеріалу.

3.1.3 Стан поверхонь деталей при обробленні округлим порошком Полімам-М

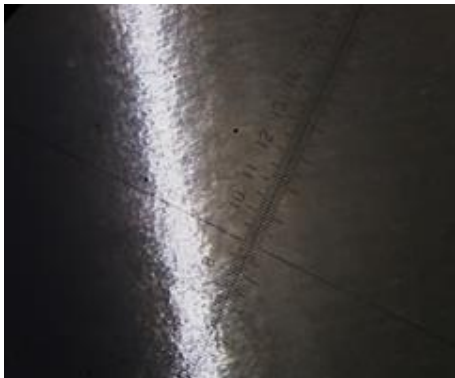
Характер переважної пластичної деформації поверхневого шару деталі при обробленні округлим порошком Полімам-М підтверджується зокрема виглядом деталі після процесу МАО. На рис. 3.6 показано фотографії поверхонь деталі після МАО з використанням порошку Полімам-М. на поверхні деталей присутні вм'ятини, що свідчать про наявність пластичної деформації, особливо інтенсивно це відбувається на поверхні бронзової деталі (рис. 3.6 б) через високу пластичність матеріалу. На поверхні титанової деталі після МАО порошком Полімам-М присутня глибока подряпина з пластично деформованими краями (рис 3.6 а), що також підтверджує відзначене вище.



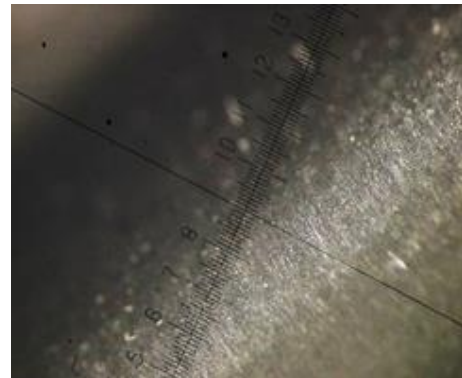
а



б



в



г

Рис.3.6. Зовнішній вигляд поверхні зразків із сплавів ВТ 8 – а), БрОЦ – б), Д16Т – в), 40Х13 – г) після МАО [71]

3.2 Дослідження нормальної складової сил взаємодії між МАІ і оброблюваною поверхнею зразків при МАО

3.2.1 Дослідження нормальної складової сил взаємодії при обробленні немагнітних зразків

Результати досліджень отримані у вигляді масиву значень зміни величини сили опору у часі (близько 30 секунд). Для кожного такого масиву було знайдено середнє значення, яке використовувалося в аналізі результатів у подальшому. Визначено, що середні значення сил опору в залежності від швидкості руху в кільцевій ванні при різних фіксованих значеннях магнітної індукції при MAO немагнітних матеріалів – бронзи, сплавів титану та алюмінію практично не відрізняються один від одного. Тому було вирішено розглядати середнє значення по всім немагнітним зразкам, гістограми сил опору з боку МАІ в залежності від швидкості та величини магнітної індукції зображені на рис. 3.7 [72].

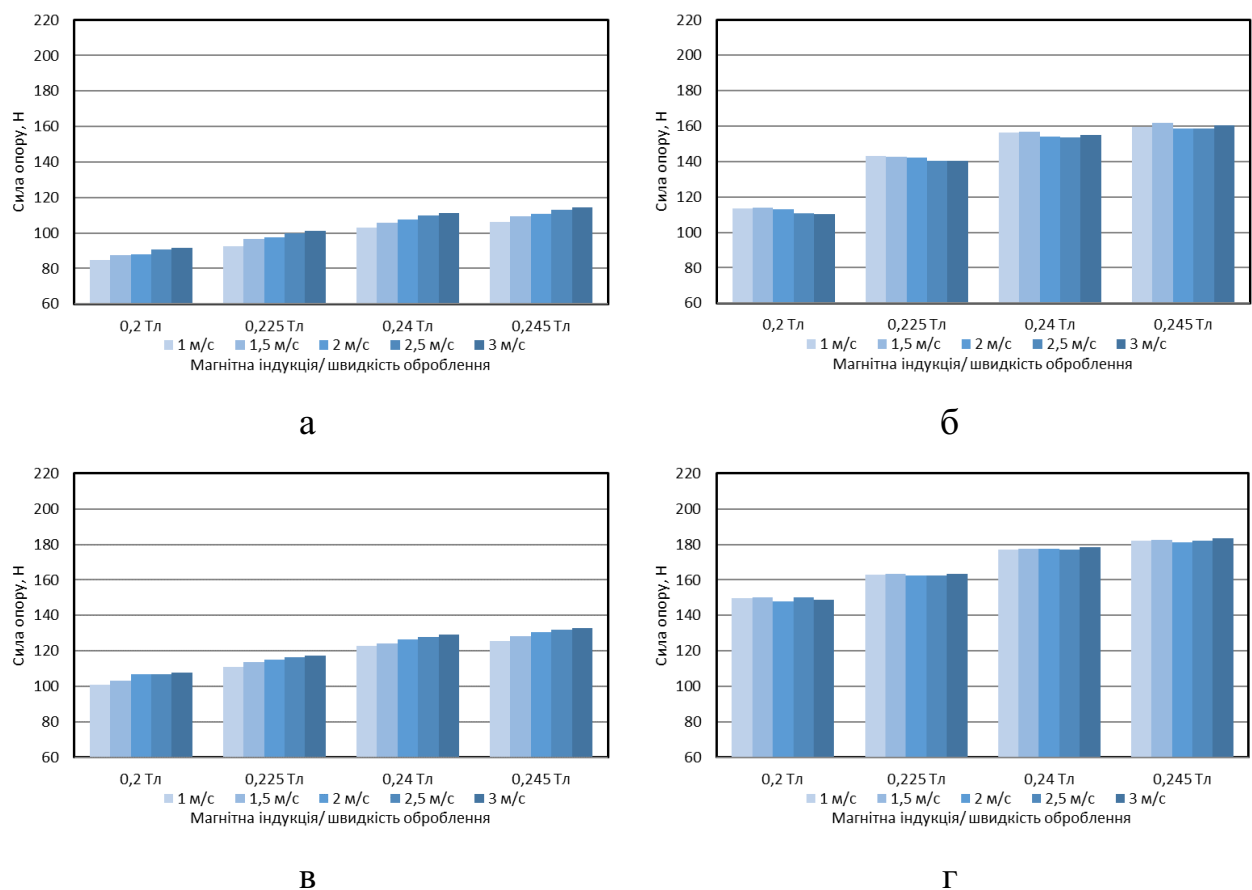


Рис. 3.7. Зміна сил опору з боку МАІ при MAO для немагнітних зразків, що виготовлені з Д16Т, ВТ 8, БрОц порошком Полімам-Т з розміром частинок 200/100 мкм – а), 400/315 мкм – б) і порошком Полімам-М з розміром частинок 200/100 мкм – в) та 400/315 мкм – г) [72]

Встановлено, що збільшення величини магнітної індукції завжди призводить до лінійного зростання сил опору. Коефіцієнт збільшення сил опору

від збільшення магнітної індукції залежить від розміру частинок порошку і становить 720 Н/Тл для порошку з зернистістю 200/100 мкм та 960 Н/Тл для 400/315 мкм. Причиною лінійного зростання сили опору є безпосередній вплив магнітної індукції на жорсткість МАІ, та, як наслідок, на опір МАІ до деформації, руху чи переформування. Оброблення порошком Полімам-М спричиняє більші в 1,2 – 1,3 рази сили опору ніж при обробленні порошком Полімам-Т. Це пояснюється кращими магнітними властивостями МАІ сформованого з порошку Полімам-М [2]. Визначено, що зміна швидкості руху деталі не має суттєвого впливу на силу опору з боку МАІ при МАО, її вплив знаходиться в межах похибки, тому цим впливом можна знехтувати [72].

3.2.2 Дослідження нормальної складової сил взаємодії при обробленні магнітних зразків

При МАО зразку з феромагнітної сталі 40Х30, залежності зміни величин сил опору зберігають ті самі тенденції, як і при МАО немагнітних зразків а саме: несуттєвий вплив швидкості руху та лінійний вплив магнітної індукції (рис. 3.8). Варто зазначити, що оброблення феромагнітної деталі зумовлює збільшену силу опору у порівнянні з неферомагнітною деталлю. Це пояснюється дією додаткових сил магнітного походження між МАП та деталлю. Феромагнітні властивості деталі підсилюють зв'язки між частками МАП, тому на розрив цих зв'язків необхідно більше енергії. Особливістю структурування МАІ є наявність декількох різних квазістабільних формоутворень МАП, а саме «мертвої зони», що знаходиться на стінках полюсних наконечників, конусоподібних утворень, що «закріплені» на наконечниках та веретеноподібних утворень, які знаходяться у проміжках між конусоподібними [2]. Розрив веретеноподібних формоутворень МАІ при МАО сталеві деталі ускладнений через магнітну взаємодію, що навпаки, зміцнює ці формоутворення. Взаємодія феромагнітної деталі з конусоподібними утвореннями зумовлює їх ущільнення, що може вести до інтенсифікації процесів заклинювання порошку та, як наслідок, збільшення сили опору [72].

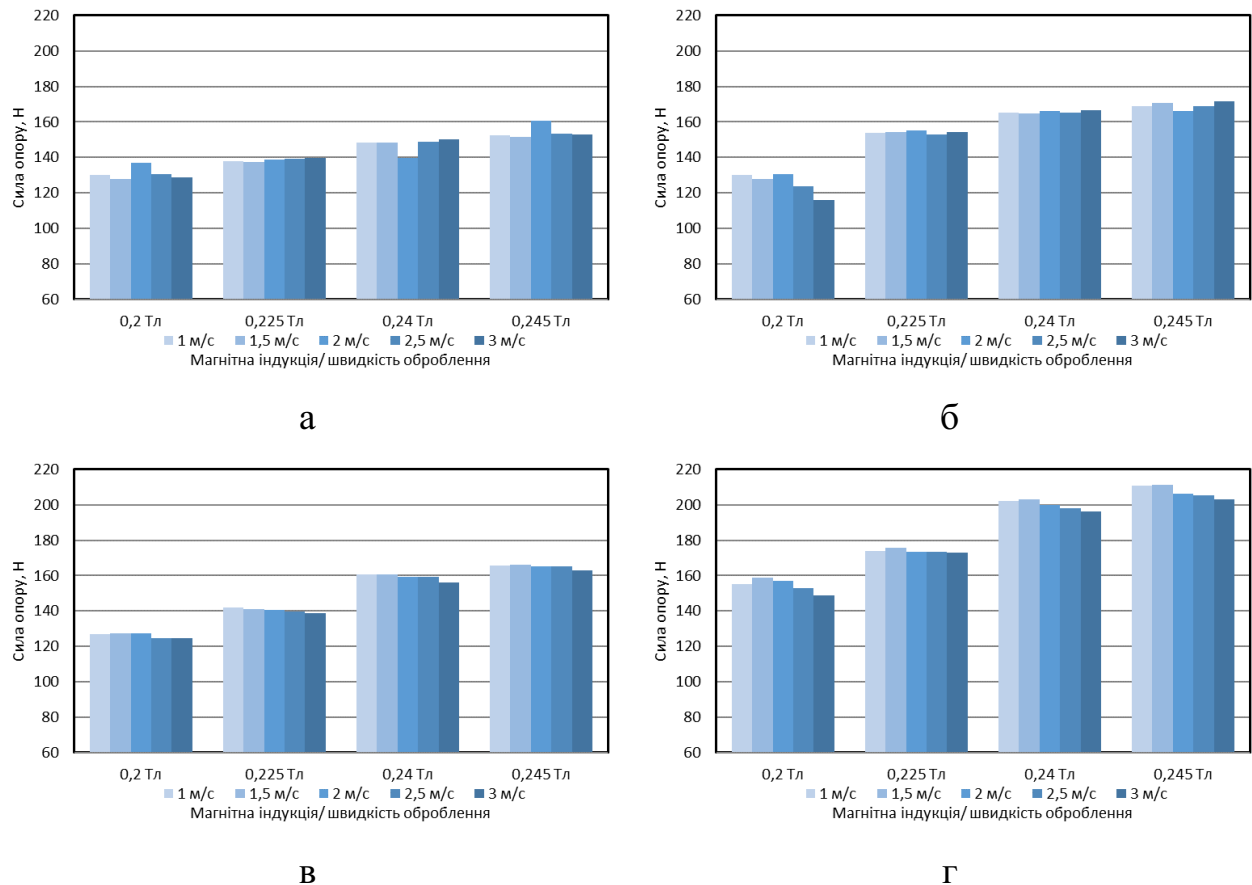


Рис. 3.8. Зміна сил опору з боку МАІ при МАО для ферромагнітних зразків, що виготовлені зі сталі 40X13 порошком Полімам-Т з розміром частинок 200/100 мкм – а), 400/315 мкм – б) і порошком Полімам-М з розміром частинок 200/100 мкм та 400/315 мкм – г) [72]

Додатково ферромагнітна деталь може спричиняти локальну зміну градієнту магнітного поля виступаючи концентратором поля. Це сприяє росту магнітної індукції в зоні між поверхнею деталі та полюсними наконечниками, що, в свою чергу, створює умови для переміщення мас порошку в ці зони. Концентрація МАП у зонах між деталлю та наконечниками спричиняє інтенсифікацію процесів заклинювання, що збільшує сили опору руху деталі при МАО. Для перевірки цього твердження було проведено аналіз зміни локальної величини магнітної індукції в робочій зоні з діа- та ферромагнітною деталлю, а також без деталі за методикою наведеною у розділі 2. Результати виконаних вимірювань наведені у вигляді топограм зміни величини магнітної індукції в різних зонах робочих зазорів показані на рис. 3.9. Підтверджено, що оброблення ферромагнітної деталі (рис. 3.9 а) спричиняє локальне зростання

індукції магнітного поля в зоні між поверхнею деталі та полюсним наконечником (від 0,24 Тл в пустому зазорі до 0,3-0,36 Тл). Таке явище може спричиняти псевдозбільшення поперечного перерізу деталі, за рахунок малорухомих часток МАП на поверхні деталі. Це в свою чергу, інтенсифікує процеси заклинювання порошку, та, як наслідок, збільшує силу опору руху деталі.

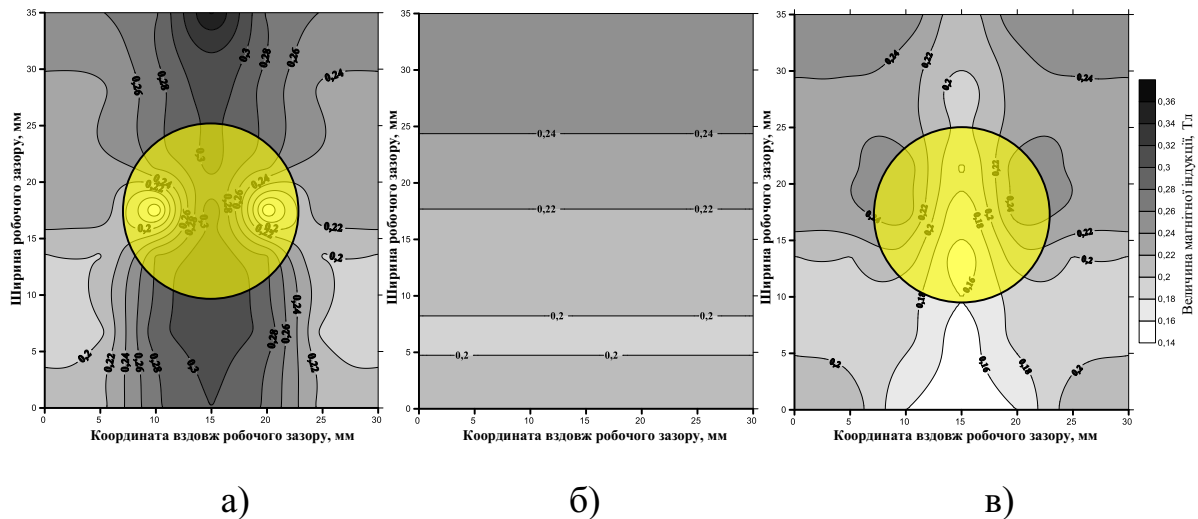


Рис. 3.9. Характер зміни магнітного поля в робочих зонах кільцевої ванни заповнених порошком Феромап з феромагнітною деталлю – а), без оброблюваної деталі – б), в) – з діамагнітною деталлю [72]

Натомість оброблення діамагнітної деталі характеризується локальним зменшенням магнітної індукції (від 0,24 Тл до 0,16 – 0,2 Тл). Магнітна індукція не спадає тільки в малих зонах безпосередньо перед та за деталлю. Таке псевдорозрідження МАІ викликає зменшення жорсткості порошку та, як наслідок, зменшення сил опору при обробленні діамагнітної деталі.

Такий перерозподіл магнітного поля зумовлює перерозподіл магнітно-абразивного порошку в робочій зоні. Тобто при обробленні феромагнітної деталі частинки МАП переміщуються до зон з підвищеною магнітною індукцією (область між деталлю та полюсними наконечниками) створюючи зони заклинювання порошку де можливе формування «мертвої» зони з малорухомого порошку. Натомість при обробленні немагнітних деталей

частинки порошку не мають суттєвого переміщення в область між деталлю та наконечниками та не викликають явища заклинювання.

3.3 Визначення коефіцієнтів тертя в парі МАІ-оброблювана поверхня.

Отримані в ході вище наведених досліджень результати дали змогу визначити функціональні залежності для сил тангенційного походження та нормальних сил. Дослідження тангенційної складової сил показали, що сила тертя прямо визначається швидкістю руху деталі в робочій зоні та швидкістю обертання деталі навколо своєї осі. Решта параметрів, такі як величина магнітної індукції та марка порошку, не носять вирішального характеру у визначенні сили тертя. Тому експериментальні данні було представлено у функціональному вигляді залежності питомої сили тертя від швидкості руху в робочій зоні (кільцевій ванні) та швидкості обертання деталі навколо своєї осі. Апроксимована поліноміальна функція залежності питомої сили тертя від швидкостей руху деталі показана у формулі (3.1)

$$F_{\text{тер}} = A_0 + A_{01}V_0 + A_{02}V_0^2 + A_{10}V_{\text{кв}} + A_{11}V_{\text{кв}}V_0 + A_{12}V_{\text{кв}}V_0^2 + \quad 3.1$$

$$+ A_{20}V_{\text{кв}}^2 + A_{21}V_{\text{кв}}^2V_0 + A_{22}V_0^2V_{\text{кв}}^2$$

Де $F_{\text{тер}}$ – величина питомої сили тертя, кПа, V_0 – швидкість обертання деталі навколо власної осі, м/с, $V_{\text{кв}}$ – швидкість обертання вздовж кільцевої ванни, м/с, A_{ij} – коефіцієнти апроксимуючого поліному (Додаток А).

Дослідження нормальних сил показали, що опір руху деталі з боку МАІ визначається величиною магнітної індукції, тобто жорсткістю інструментального середовища МАІ, що створює опір руху деталі. Натомість швидкість руху деталі не змінює величину опору. Експериментальні дослідження було представлено у вигляді апроксимованої функції (3.2).

$$F_{\text{оп}} = C_{00} + C_{01}B + C_{02}B^2 + C_{10}V_{\text{кв}} + C_{11}V_{\text{кв}}B + C_{12}V_{\text{кв}}B^2 + \quad 3.2$$

$$+ C_{20}V_{\text{кв}}^2 + C_{21}V_{\text{кв}}^2B$$

Де $F_{\text{оп}}$ – величина питомої сили тертя, кПа, B – Величина магнітної індукції, м/с, $V_{\text{кв}}$ – швидкість обертання вздовж кільцевої ванни, м/с, C_{ij} –

коефіцієнти апроксимуючого поліному (Додаток А). Питома сила опору представлена у вигляді топограм поверхонь зміни питомих сил опору в залежності від магнітної індукції та швидкості переміщення зразків уздовж кільцевої ванни на рис. 3.10. Показано характерні топографи для магнітних та немагнітних матеріалів при обробці різними порошками.

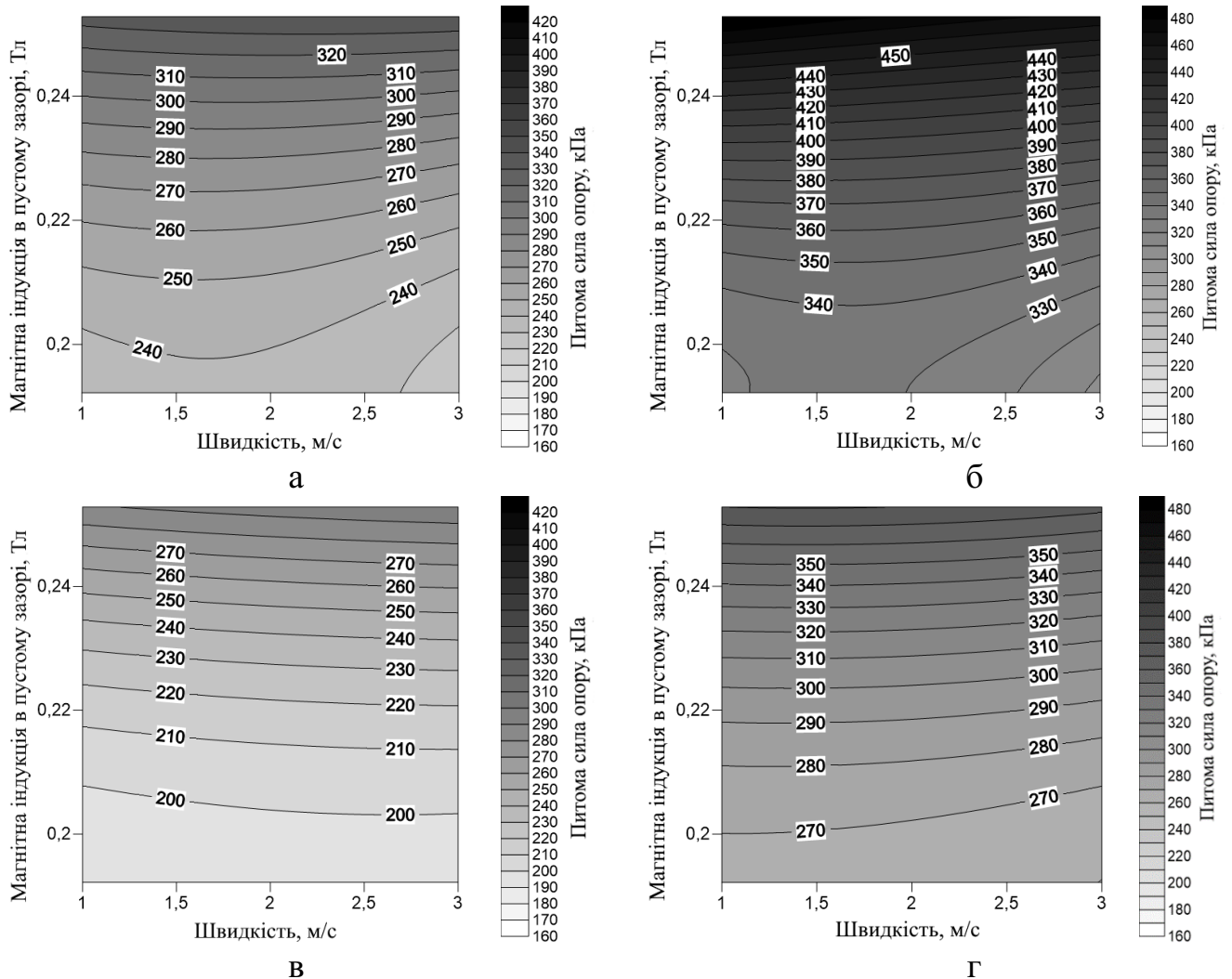


Рис. 3.10. Зміна питомих сил лобового опору в залежності від магнітної індукції в робочих зазорах та швидкості обертання деталей навколо осі кільцевої ванни при MAO порошком Полімам-Т (400/315 мм) – а, б та порошком Полімам-М (200/100 мкм) – в, г зразків з немагнітних матеріалів – а, в та феромагнітних матеріалів – б, г [73]

Визначено, що при MAO немагнітних матеріалів питомі сили опору в 1,2-1,45 рази нижче, ніж із обробці зразків з феромагнітної сталі [73].

Отримані аналітичні представлення сили питомого тертя та питомого опору, дозволяють визначити співвідношення між ними, яке є фактичним аналогом коефіцієнту тертя в парі МАІ – поверхня оброблюваної деталі (формула 3.3), що загалом визначається триботехнічними властивостями деталі та умовами взаємодії деталі з окремими квазістабільними формуваннями МАІ.

$$F_{\text{тер}}/F_{\text{оп}} = \eta \quad 3.3$$

Характерні значення параметру η показано на рисунку 3.11 в залежності від швидкості руху деталі в робочій зоні та швидкості обертання навколо власної осі.

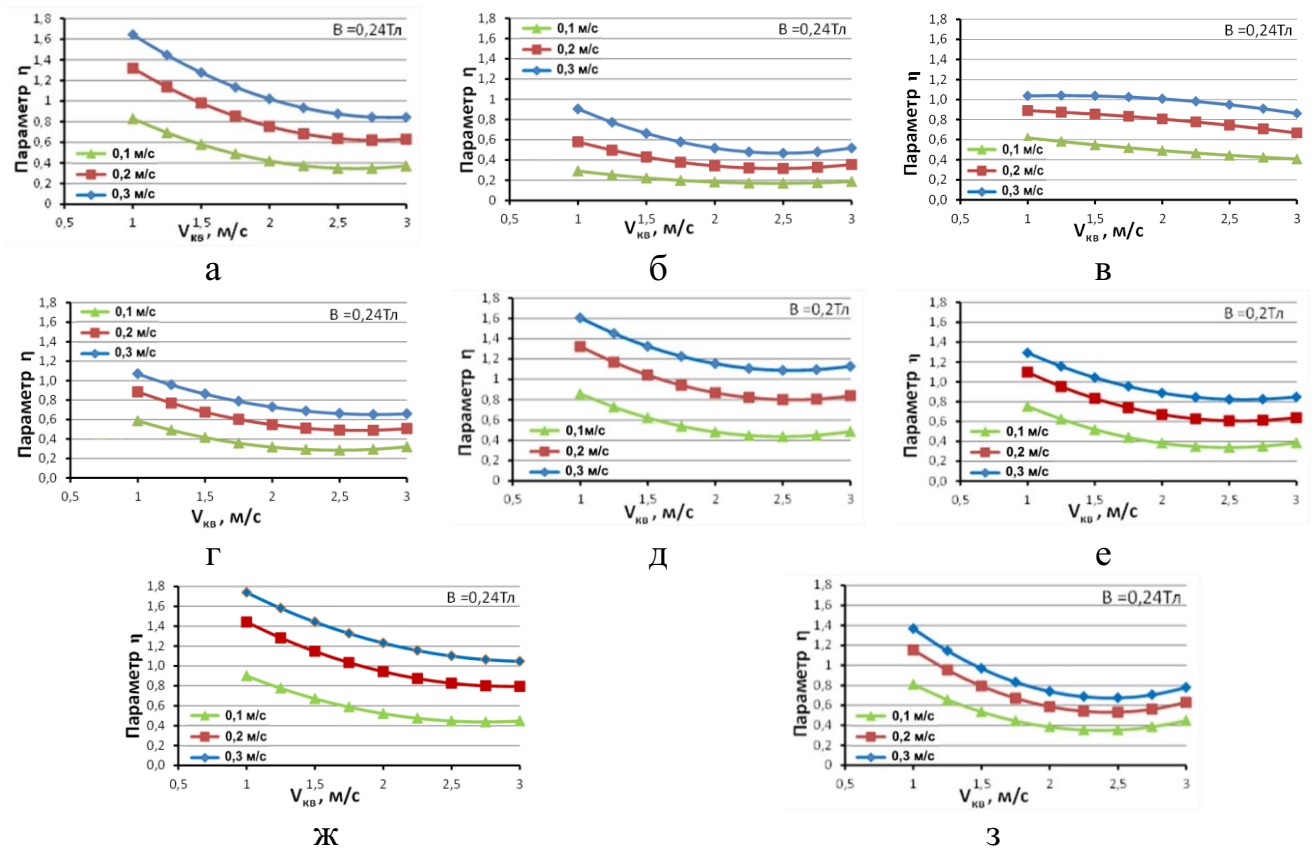


Рис. 3.11. Зміна параметра η залежно від швидкості обертання навколо осі кільцевої ванни та швидкостях обертання навколо власної осі 0,1 - 0,3 м/с при MAO порошком Полімам-М: а,в,д,ж, порошком Полімам-Т: б,г,е,з; з розмірами частинок 200/100мкм: б,г,д,е,ж та 400/315 мкм: а,в,з [73]

Визначено, що збільшення швидкості обертання навколо власної осі деталі спричиняє до пропорційного зростання величини параметру η . Також встановлено, що зростання швидкості руху деталі в кільцевій ванні призводить

до монотонного зменшення параметру η . Це зумовлено перерозподілом впливу складових швидкості оброблення, так на малих швидкостях руху в робочій зоні суттєвий вплив на тертя створює рух обертання деталі навколо своєї осі, при збільшенні швидкості руху в робочій зоні цей вплив зменшується [73].

3.4 Висновки

Виконано дослідження тангенційної складової сил взаємодії деталі та МАІ. Показано, що ефективний момент тертя прямо залежить від величини магнітної індукції, швидкостей руху деталі в робочій зоні та навколо своєї осі та становить $0 - 1,4$ Нм для магнітних деталей та $0 - 0,9$ для немагнітних.

Встановлено області МАО при яких відбувається: формування квазістабільного МАІ (при швидкості обертання навколо власної осі $0 - 10$ рад/с), область стійкого МАІ ($10 - 65$ рад/с) та область з аномальним ростом/падінням сил тертя (більше 65 рад/с). Ріст відбувається при використанні порошків осколької форми, падіння – округлої форми.

Визначено процеси пов'язані з особливостями поведінки часток МАІ при безпосередньому контакті з оброблюваними деталями в процесі МАО, та виникненням зон заклинювання порошку, що знаходяться між поверхнею деталі та полюсними наконечниками верстата.

Показано, відмінності в характері взаємодії між МАП та деталлю, так використання порошків з округлою формою (Полімам-М) спричиняє переважно пластичне деформування поверхневого шару оброблюваної поверхні зразків з діа- та парамагнітних зразків. Найбільший вплив на зміну сил фрикційного походження має збільшення розміру часток МАП.

Визначено, що сили опору при МАО зразків з немагнітних матеріалів Д16Т, ВТ8, БрОц практично не відрізняються, тому прийнято обмежуватися одним немагнітним матеріалом у наступних дослідженнях.

Показано, що сили опору суттєво залежать від магнітних та реологічних властивостей магнітно-абразивного інструменту. При МАО лобовий опір для немагнітних деталей практично однаковий і не залежить від швидкості

оброблення, а зі збільшенням магнітної індукції у робочих зонах має місце його лінійне зростання.

Коефіцієнт збільшення лобового опору, що визначається магнітним полем, для порошків розміром частинок 400/315 мкм становить 960 Н/Тл, а для розміру 200/100 мкм – 720 Н/Тл.

Показано, що сили лобового опору при МАО феромагнітних зразків як і для немагнітних зразків не залежать від швидкості оброблення і змінюються в діапазоні від 160 до 220 Н, це в 1,2-1,45 разів вище, ніж для немагнітних деталей, що пов'язано з дією сил магнітного походження та особливостями взаємодії структурних елементів МАІ з оброблюваними поверхнями, формуванням зон заклинювання між поверхнею деталі та полюсними наконечниками кільцевої ванни.

За результатами аналітичного представлення функцій зміни величин питомих сил тертя і сил лобового опору розраховано співвідношення між питомими силами тертя і опору $-F_{\text{тер}}/F_{\text{оп}} = \eta$ – параметр коефіцієнту тертя при МАО. За характером зміни величини η встановлено, що зі збільшенням швидкості руху деталей навколо осі кільцевої ванни, переважно, має місце монотонне зменшення параметру коефіцієнту тертя. Зростання швидкості обертання деталей навколо власної осі призводить в досліджуваному діапазоні практично до пропорційного збільшення величини η .

РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РОЗМІРІВ ОБРОБЛЮВАНОЇ ДЕТАЛІ НА СИЛИ ПРИ МАО

Наступний етап дослідження полягав у визначенні особливостей формування середовища МАІ через вплив зміни розміру оброблюваних деталей.

Для визначення сил опору в залежності від розміру циліндричної деталі було використано методику дослідження сил опору руху деталі з боку МАІ викладену в розділі 2. Зразками, що брали участь в експерименті були циліндричні деталі діаметрами 8, 12, та 16 мм, висотою 30 мм з феромагнітної сталі 40Х13 та парамагнітного сплаву титану ВТ8 (рис 2.4. а). Такий вибір зумовлений результатами попереднього розділу, що вказують на відсутність різниці в силі опору при зміні матеріалу оброблюваної деталі.

4.1 Залежність сили опору зі сторони МАІ при МАО від розмірів деталей та технологічних умов

Отримані внаслідок дослідження данні були згруповані в гістограми що показують значення сили опору в залежності від швидкості оброблення та величини магнітної індукції. При обробленні титану ВТ8 порошком марки Полімам-М (рис 4.1) можна спостерігати наступні тенденції: збільшення магнітної індукції спричиняє зростання сили опору, натомість зміна швидкості оброблення не має значного впливу на сили опору. Збільшення розміру деталі та зернистості МАІ стабільно призводить до збільшення значення сил опору. Такі результати вказують на прямий вплив величини магнітної індукції через збільшення жорсткості МАІ.

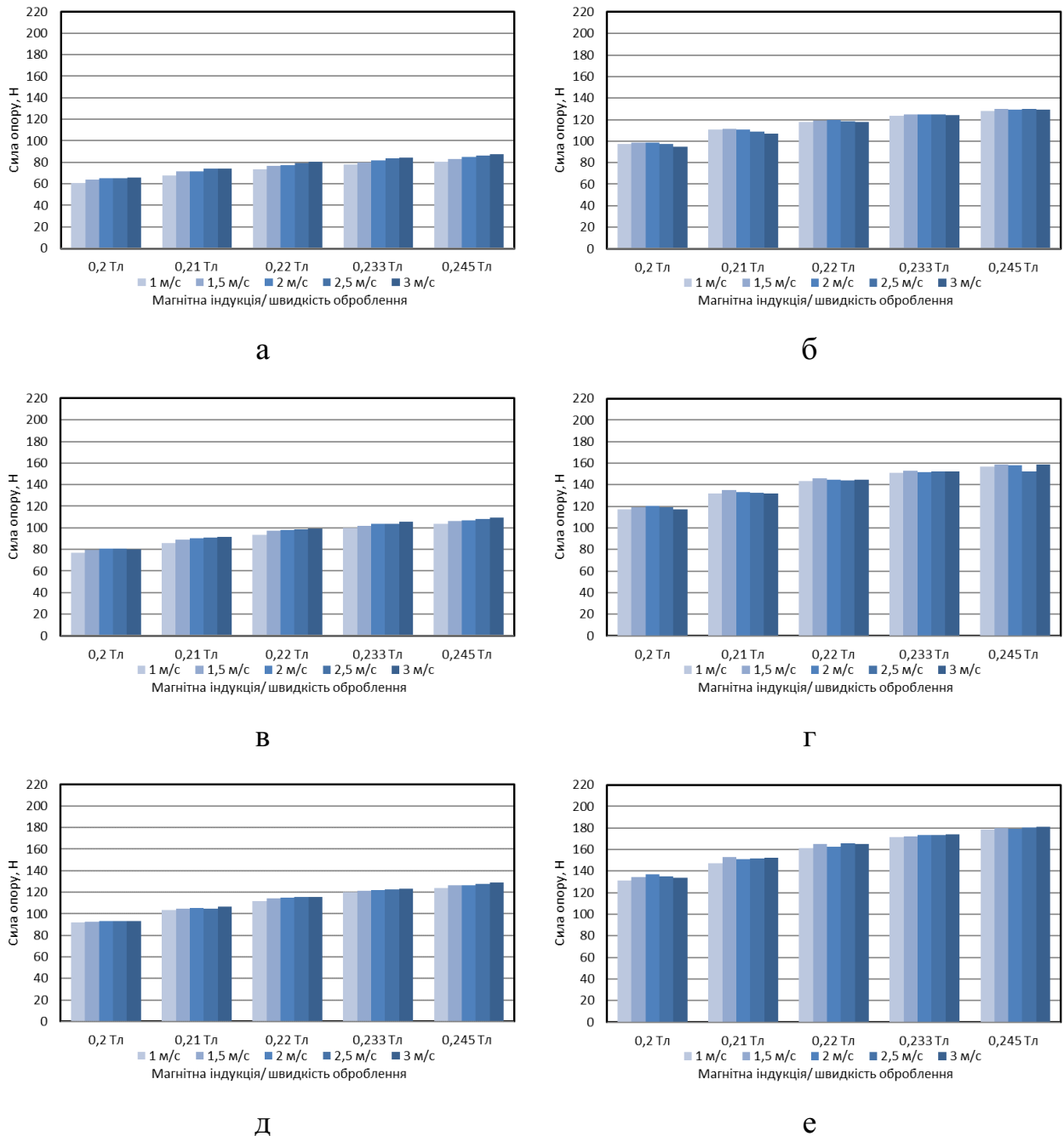


Рис. 4.1. Значення сили опору при обробленні деталей з титану ВТ8 діаметром 8 (а,б) 12 (в,г) 16 (д, е) мм порошком Полімам-М з зернистістю 200/100 (а, в, д) та 400/315 (б, г, е) мкм

При зміні марки порошку на Полімам-Т зазначені тенденції залишаються незмінними (рис. 4.2).

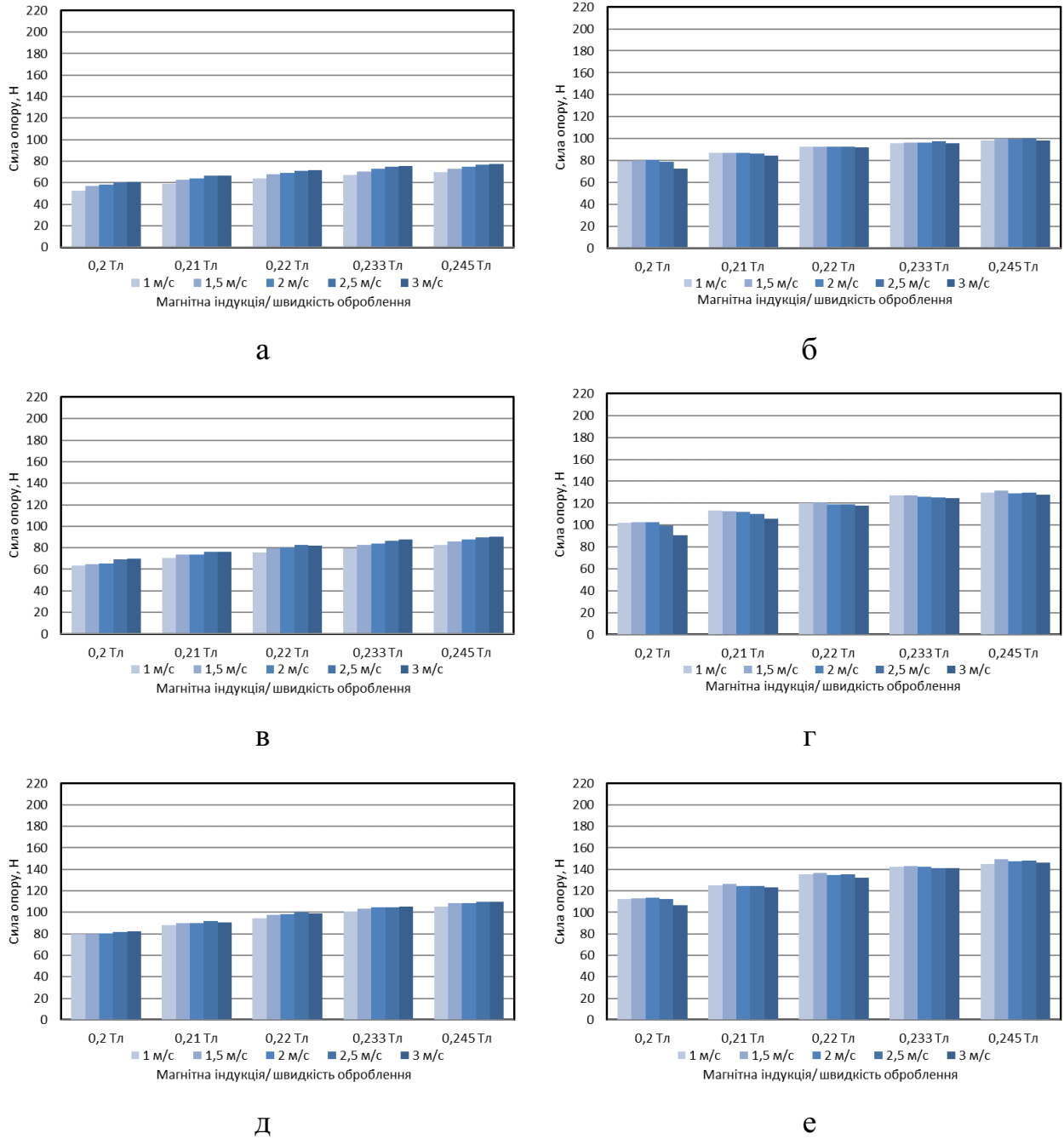


Рис. 4.2. Значення сили опору при обробленні деталей з титану BT8 діаметром 8 (а,б) 12 (в,г) 16 (д, е) мм порошком Полімам-Т з зернистістю 200/100 (а, в, д) та 400/315 (б, г, е) мкм

Оброблення сталі 40X13 з використанням порошку Полімам-М (рис. 4.3) в цілому супроводжується таким самими явищами та закономірностями, як і при обробленні титану BT8, проте феромагнітні властивості сталі зумовлюють

загалом більші значення сили опору у порівнянні з значеннями, отриманими при обробленні парамагнітного титану.

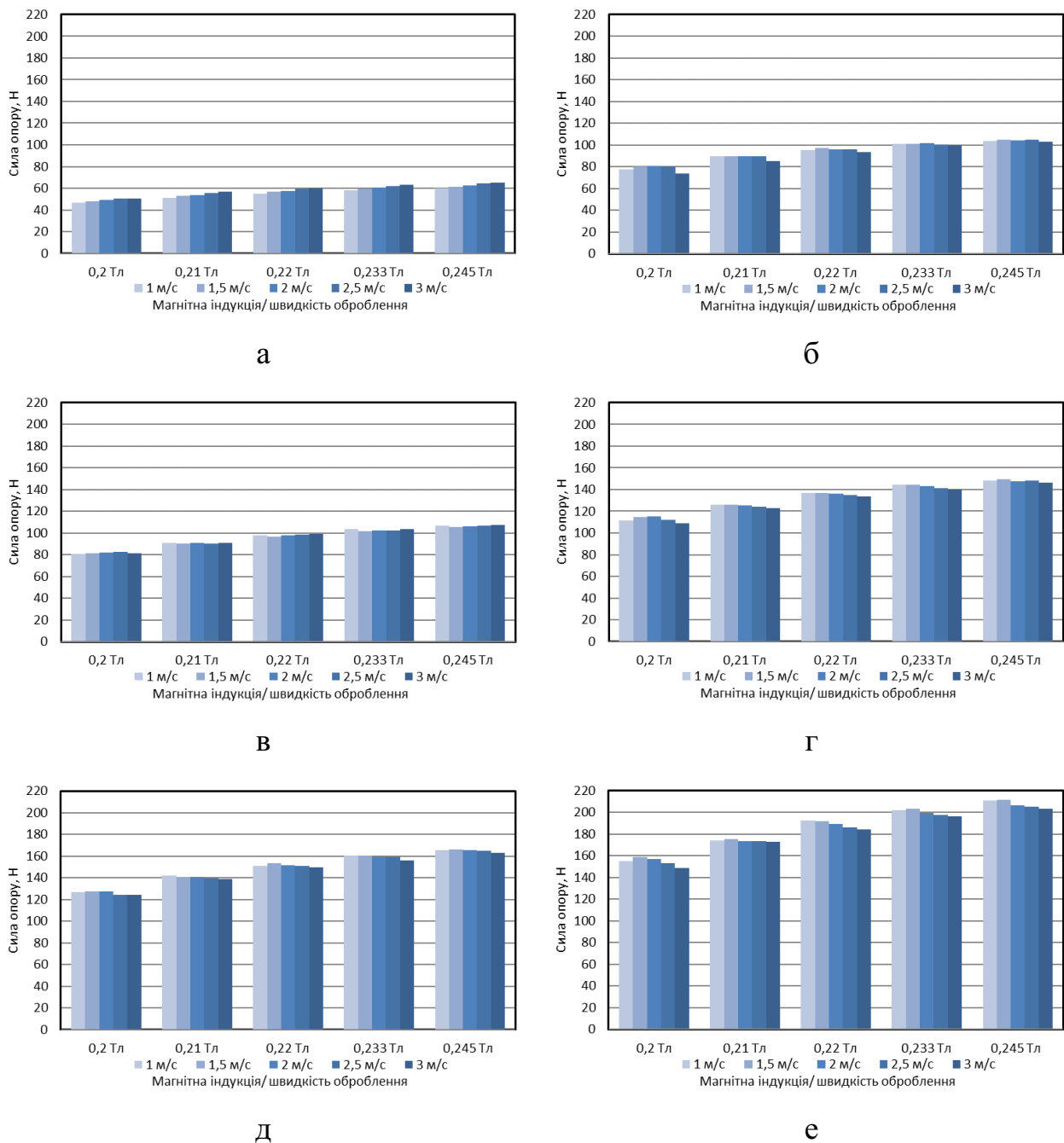


Рис. 4.3. Значення сили опору при обробленні деталей зі сталі 40X13 діаметром 8 (а,б) 12 (в,г) 16 (д, е) мм порошком Поліам-М з зернистістю 200/100 (а, в, д) та 400/315 (б, г, е) мкм

Не відрізняються загальні тенденції в результатах значення сил опору при обробленні сталевих деталей з використанням порошку Поліам-Т (рис. 4.4).

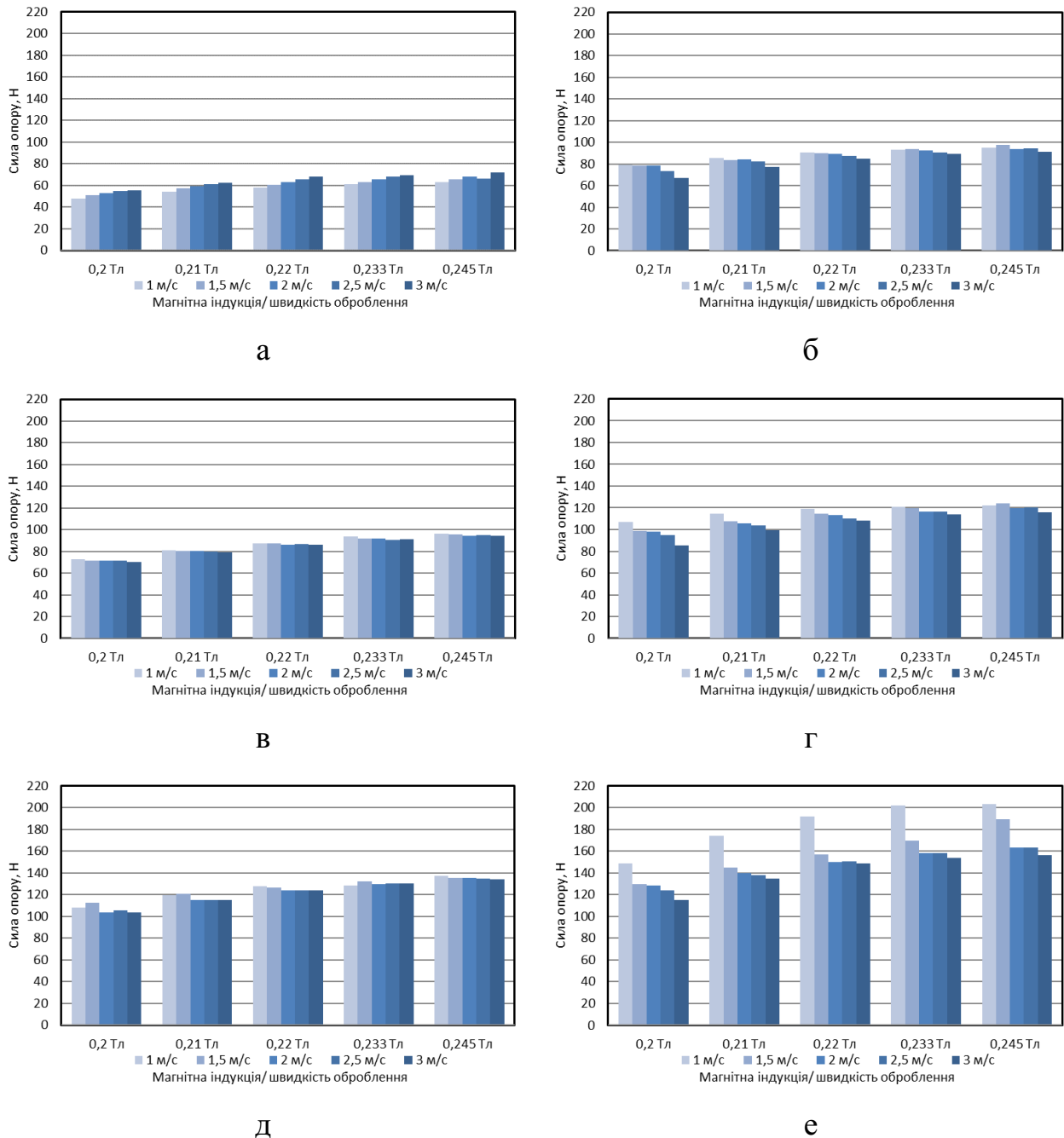


Рис. 4.4. Значення сили опору при обробленні деталей зі сталі 40Х13 діаметром 8 (а,б) 12 (в,г) 16 (д, е) мм порошком Поліам-Т з зернистістю 200/100 (а, в, д) та 400/315 (б, г, е) мкм

Припустимо, що рух деталі в процесі МАО можна частково описати за допомогою законів гідродинаміки. Тому, теоретично, сила опору руху деталі при МАО може описуватися формулою (4.1):

$$F = C \cdot S \frac{\rho V^2}{2} \quad 4.1$$

Де, C – коефіцієнт гідравлічного опору, що залежить від форми тіла, S – площа поперечного перерізу тіла, V – швидкість руху, ρ – густина середовища [74, 75]. Згідно цієї формули та при незмінності інших факторів, теоретично, збільшення діаметру деталі у 2 рази повинно спричинити збільшення сили опору у 2 рази. Для перевірки даного твердження, та для детального дослідження впливу діаметру циліндричної деталі на значення сили опору, було проведено відсоткове порівняння результатів оброблення. У порівнянні результатів за 100% було прийнято значення при обробленні деталей діаметром 8 мм, результати випробувань при діаметрах 12 та 16 мм обраховувалися відносно 8 мм що дозволило ліквідувати вплив інших факторів оброблення на дослідження. Результат дослідження впливу діаметру при обробленні титанових деталей (табл. 4.1) вказує на те, що збільшення сили опору не є пропорційним збільшенню розміру оброблюваної деталі. Тобто при збільшенні діаметру деталі на 50% (з 8 до 12 мм) відбувається збільшення сили опору на 20-30%, а при збільшенні діаметру на 100% (з 8 до 16 мм), сила опору збільшується на 30-50%. Такі результати вказують на те, що рух об'єктів (у даному випадку – циліндричної деталі) у середовищі МАІ суттєво відрізняється від руху таких самих типів об'єктів в інших середовищах (таких як вода та повітря, де збільшення опору є прямо пропорційним площі поперечного об'єкту). Тому дослідження процесу МАО необхідно проводити з використанням особливих моделей середовища, що не є схожими з моделями газів чи рідини.

Для пояснення отриманих результатів розглянемо особливості реології МАІ. В роботах [3, 36] показано, що МАІ складається з декількох основних типів квазістабільних формоутворень (рис. 1.6): конусоподібних стовпчиків висотою 11 – 12 мм та діаметром 3 – 3,5 мм, що потовщеною стороною закріплені на краях робочої зони, веретеноподібних утворень що заповнюють собою простір між конусоподібними стовпчиками та малорухомою «мертвою»

зоною, що виникає при робочій зоні в 35 мм (умови ідентичні експериментальним) [3, 36, 76].

Таблиця 4.1. Відсоткове відношення приросту сили опору до приросту діаметру деталі з титану BT8. [76]

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	125	121-128	121	117-123
16	200	147	141-154	138	133-142
Полімам-Т		200/100		400/315	
12	150	116	112-120	129	124-132
16	200	142	134-151	145	140-149

Ширина «мертвих» зон в даних технологічних умовах сягає 5 – 6 мм [3, 57 – 59], тому прямої взаємодії на деталь під час оброблення це утворення не має. З огляду на це, розглянутий вплив лише конусоподібних та веретеноподібних утворень. На рисунку 4.5 схематично зображено проходження експериментальних деталей через структурні формування (1 – конусоподібні утворення, 2 – «мертві» зони, 3 – веретеноподібні утворення) та їх взаємодію (з урахуванням розмірів деталей та формоутворень). Запропонована схема оброблення показує, що характер взаємодії деталі та утворень МАІ відрізняється при зміні розміру деталі, так деталь діаметру 8 мм (рис 4.5 а) практично не взаємодіє з конусоподібними формуваннями через їх розмір, тому оброблення супроводжується взаємодією з веретеноподібними формуваннями. Натомість оброблення деталі діаметром 16 мм (рис. 4.5 в) супроводжується взаємодією поверхні деталі з конусоподібними утвореннями, деталь діаметром 12 мм (рис 4.5 б) також взаємодіє з цими утвореннями, проте ця взаємодія дещо менше.

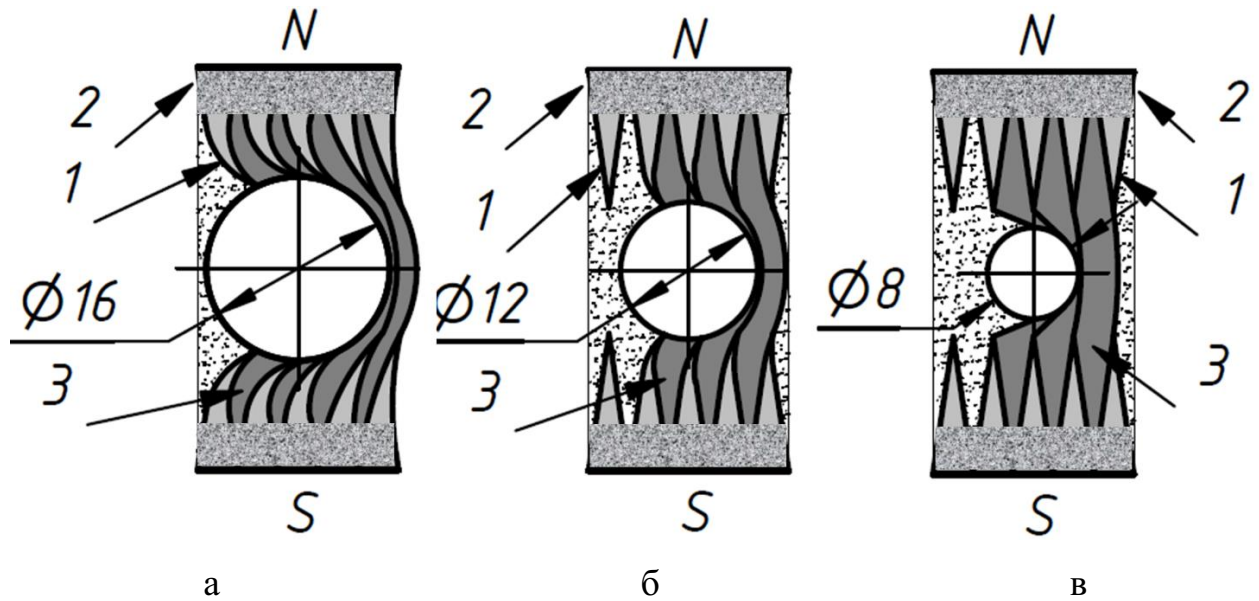


Рис. 4.5. Характер взаємодії деталей різних розмірів з утвореннями в МАІ [76].

Вважається, що Конусоподібні утворення мають властивість відхилятися від свого положення при накладенні на них сили та повертатися назад при зникненні цієї сили. Тобто при русі деталі можуть відбуватися коливання формоутворень МАІ, що можуть створювати окремі явища такі як додаткове тертя порошку з поверхнею деталі та додаткове перемішування часточок МАІ в робочій зоні, такий характер взаємодії потребує додаткового дослідження. Взаємодія веретеноподібних утворень з деталлю відрізняється, оскільки ці «веретена» не закріплені та можуть переміщатися, переорієнтовуватися та перемішуватися, що вносить додаткові та хаотичні енергетичні втрати процесу. Вважається [2], що в цих утвореннях можуть додатково виникати електромагнітні процеси, що сприяють виникненню пондеромоторних сили, які також можуть створювати додаткове силове навантаження на процес МАО. При обробленні великих деталей, що контактують з конусоподібними утвореннями (діаметром 12 та 16 мм) процеси переорієнтації веретено подібних утворень можуть стримуватися, оскільки ці утворення заклинюються між поверхнею оброблюваної деталі та конусоподібними формуваннями. Такий характер оброблення може забезпечувати отримані раніше значення, де оброблення деталей меншого розміру супроводжувалося відносно великими значеннями сили опору.

Також таке явище можна пояснити витісненням МАП з робочої зони. На рисунку 4.6 продемонстровано структуру МАІ при проходженні деталей різних діаметрів (4, 8, 16 та 20 мм), показано, що проходження деталей більшого діаметру (16 та 20 мм) супроводжується витісненням значної порції МАП за межі робочої зони та утворенням зон недостатньо заповнених порошком після проходження деталі.

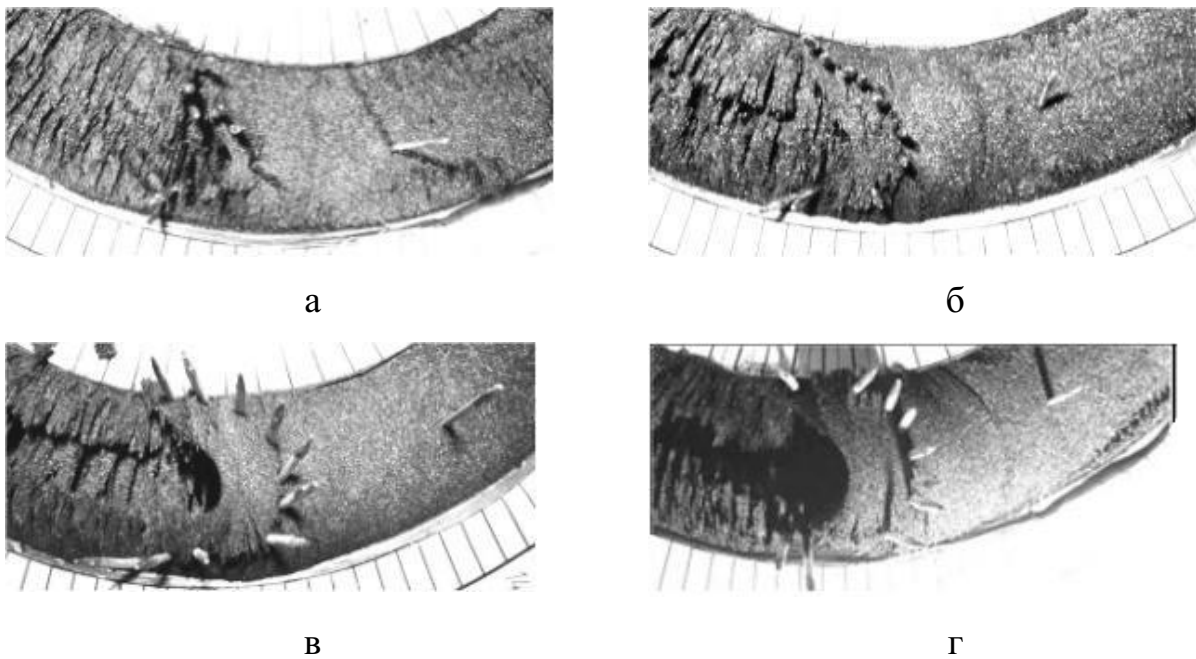


Рис. 4.6. Структура МАІ в результаті проходження деталі різних діаметрів, а – 4 мм, б – 8 мм, в – 16 мм, г – 20 мм [3, 36, 76]

Ймовірно, витіснений порошок, що більше не приймає участі в процесі МАО, зумовлює розрідження середовища МАІ та з наступним проходженням деталі в середовищі, сила, що протистоїть цьому руху зменшується. Тому при обробленні деталей великих діаметрів сила опору менше очікуваного відносно деталі малого діаметру. Однак, МАП має властивість до відновлення, тобто повернення в робочу зону у вигляді формоутворень МАІ, швидкість повернення порошку в робочу зону, тобто швидкість відновлення МАІ лишається недостатньо вивченою, тому для точного визначення впливу

витіснення порошку на силові характеристики необхідні додаткові дослідження [76].

Також відсоткове відношення приросту сили лобового опору до приросту діаметру деталі було визначено і для деталей зі сталі 40X13. В таблиці 4.2 показано, що приріст при обробленні сталеві деталі відрізняється від приросту при обробленні титанові деталі.

Таблиця 4.2. Відсоткове відношення приросту сили лобового опору до приросту діаметру деталі зі сталі 40X13 [76].

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	168	160-178	141	138-147
16	200	261	245-276	197	191-203
Поліам-Т		200/100		400/315	
12	150	138	126-152	127	125-134
16	200	201	182-224	179	163-217

Визначено, що при збільшенні діаметру деталі зі сталі сила опору зростає приблизно у такому самому відношенні, проте ця залежність не є стабільною для кожного експерименту. Так при обробленні деталі діаметром 16 мм та МАІ сформованого порошком Поліам-Т 400/315 мкм був присутній суттєва неоднорідність результатів, а при обробленні за допомогою МАІ сформованого з порошку Поліам-М 200/100 мкм результат був суттєво вище очікуваного. Це вказує, по-перше на різність механізмів оброблення феро- і парамагнітних деталей, по-друге на нестабільність оброблення феромагнітних деталей. Тобто через магнітну взаємодію МАІ з оброблюваною деталлю, процес МАО стає більш чутливим до типу та зернистості порошку. Це виражено, насамперед, суттєво більшим відношенням приросту при використанні порошку Поліам-М ніж порошку Поліам-Т, що зумовлено більшою магнітною проникністю та більш щільним пакуванням округлого порошку Поліам-Т в робочій зоні [2].

Тому зростання сили опору при збільшенні діаметру при оброблення феромагнітних деталей, загалом, відповідає очікуваному, проте через магнітну взаємодію оброблюваної деталі з МАП присутня чутливість процесу до особливостей типу МАП.

Для безпосереднього порівняння відношення величини сили опору при обробленні феро- та парамагнітних деталей, було проаналізовано відсоткове відношення між отриманими значеннями сили опору феромагнітних деталей до парамагнітних для кожного експерименту. Встановлено (табл. 4.3), що сила опору при обробленні деталей зі сталі діаметром 16 мм складає 110-130% сили при обробленні такої самої деталі з титану. Для діаметру 12 мм матеріал деталі не має суттєвого впливу на величину сили опору. Для деталей діаметром 8 мм сила опору при обробленні сталевих деталей складає 80-90% сили опору при обробленні титанових деталей.

Таблиця 4.3 Відсоткове відношення сили опору при обробленні феромагнітних деталей до сили опору при обробленні парамагнітних деталей [76].

Діаметр, мм/ Марка МАП	Відношення усереднене, %	Відношення Мін-макс, %	Відношення усереднене, %	Відношення Мін-макс, %
Поліам-М	200/100 мкм		400/315 мкм	
8	75	73-77	80	78-82
12	100	98-105	94	92-97
16	132	126-137	115	111-119
Поліам-Т	200/100 мкм		400/315 мкм	
8	91	86-95	95	91-99
12	108	100-117	94	90-104
16	128	122-141	117	107-142

Такий неочікуваний результат пояснюється зазначеним вище характером взаємодії деталі (рис. 4.5). Тобто при обробленні деталей великого діаметру оброблення зводиться до тертя оброблюваної поверхні та МАП сформованого у стійкі конусоподібні утворення [71, 72, 76]. Вважається, що тертя в парі МАП –

феромагнітна деталь більше ніж у парі МАП – парамагнітна деталь, через додаткову магнітну взаємодію порошку з поверхнею деталі [70, 76]. Оскільки оброблення деталей діаметром (8 мм) характерне взаємодією деталі з веретеноподібними формуваннями, магнітні властивості сталеві деталі можуть створювати зворотній ефект на силу опору. Вважається [2], що в представницьких об'ємах МАП діють пондеромоторні сили, що можуть як збільшувати, так і зменшувати величину магнітної індукції локальних магнітних полів. Ймовірно, при обробленні сталеві деталі діаметром 8 мм відбувається процес переформатування веретеноподібних утворень. На рис. 4.7 показано процес проходження деталі діаметром 8 мм 1 через конусоподібні 2 веретеноподібні 3 формування з подальшою руйнацією веретеноподібного формування. На рис 4.7 а – зображено початковий момент руху деталі через середовище МАІ та контакт деталі з веретеноподібним формуванням, далі на рис. 4.7 б – показано процес зміщення та деформації веретеноподібного утворення на цьому етапі веретеноподібне утворення заклинюється між деталлю та конусоподібними формуваннями МАІ. Далі на рис. 4.7 – в, веретеноподібне формування через тиск на нього оброблюваної деталі зазнає деформації, що при подальшому русі, викликає руйнування утворення та його розпад на декілька частин. Зображене на рис. 4.7 в руйнування веретеноподібного утворення, ймовірно, викликає активізацію пондеромоторних сил та утворення нових локальних мікрополів, що при взаємодії з феромагнітною деталлю знижують загальну індукцію локального поля та створюють псевдорозрідження середовища МАІ, що і може бути причиною зазначеного вище явища [2, 24, 76].

Дослідження допомогли також визначити вплив розміру зерен МАП на силу опору при МАО. Прийнято, що розмір зерен порошків з фракцією 400/315 мкм у середньому становить 140% у порівнянні з зернами порошків 200/100 мкм. Вирахувано відсоткове відношення між значеннями сили опору при використанні порошків з різною зернистістю (табл. 4.4). Визначено, що різниця значень сил опору при використанні порошку з великою зернистістю

приблизно на 120-160% більша у порівнянні значеннями сили опору при використанні дрібнозернистого порошку. Тобто сила опору в середньому збільшується на 40%, що практично пропорційно до зміни розміру часток порошку. Це вказує на пряму залежність сили опору від розміру часток порошку.

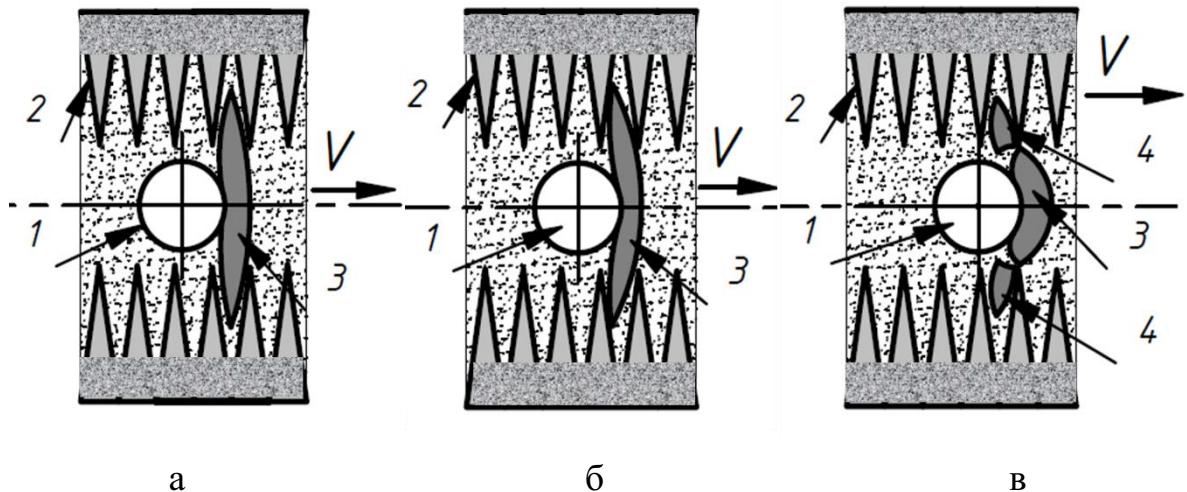


Рис. 4.7. Ймовірне переформування веретеноподібних утворень при обробленні деталей малого діаметру (8 мм)

Таблиця 4.4. Порівняння різниці розміру зерен порошку та різниці в силах лобового опору, при МАО [76].

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

Дещо більші значення присутні для порошку Полімам-М при обробленні деталей діаметром 8 мм (150-160%). Пояснюється це явище тим, що між деталлю малих розмірів (при однакових інших умовах) та полюсними наконечниками має місце великий магнітний зазор, що сприяє процесам переформування МАІ та зменшує вплив процесів заклинювання порошку. Тобто, зменшення впливу динамічних чинників. Проте, при використанні крупнозернистого порошку Полімам-М магнітний зазор стає меншим відносно

зерен порошку та відбувається зворотне, тобто вищий вплив динамічних чинників над магнітними. Це і стає причиною високої різниці в силі опору між обробленнями з використанням дрібно- та крупнозернистих порошків. Натомість при обробленні сталевих деталей великого діаметру (16 мм) різниця значень сил опору дещо менша ніж різниця розміру зерен порошку. Це вказує на ймовірні процеси магнітної взаємодії між МАІ, феромагнітною деталлю та полюсними наконечниками, що суттєво більше впливають на сили опору ніж механічна взаємодія. Додатково розглянуто вплив швидкості оброблення на різницю опору при використанні порошків різних фракцій. Визначено, що вплив розміру зерен порошку зменшується зі збільшенням швидкості (для всіх розглянутих розмірів та матеріалів деталі). На рис. 4.8 представлені характерні гістограми залежностей різниці сили опору від швидкості оброблення. З'ясовано, що зростання швидкості оброблення нівелює вплив різниці розмірів зерен порошку на значення сили опору. Це явище яскраво виражене при обробленні порошком Полімам-Т. Данні результати вказують на характер впливу динамічних чинників, тобто, високі швидкості оброблення зменшують інтенсивність заклинювання масиву порошку в магнітному зазорі, тому розмір часток порошку має менший вплив на сили опору та на MAO загалом.

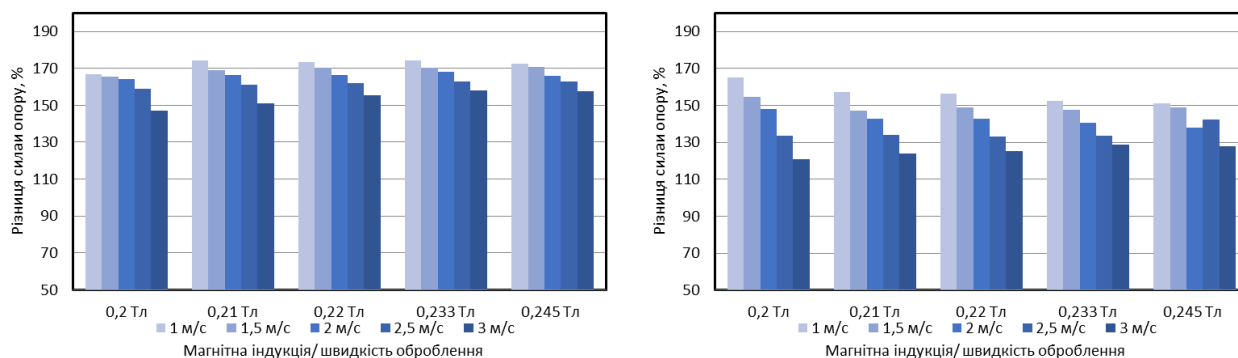


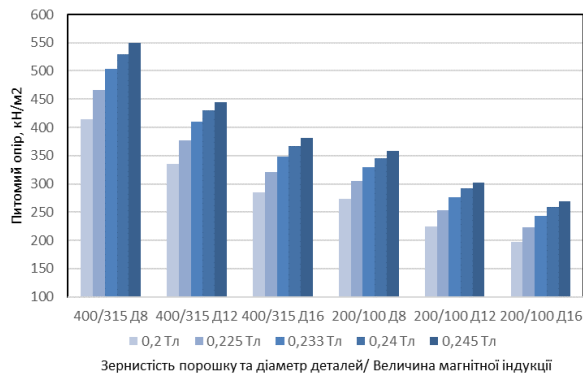
Рис. 4.8. Різниця сили опору між порошками Полімам-М (ліворуч) та Полімам-Т (праворуч) з зернистістю 400/315 та 200/100 мкм залежності від швидкості оброблення та величини магнітної індукції при обробленні деталі діаметром 8 мм зі сталі 40X13 [76]

Також було розглянуто вплив марки порошку на значення сили опору зі сторони МАІ при MAO. Визначено, що при обробленні порошком Полімам-М

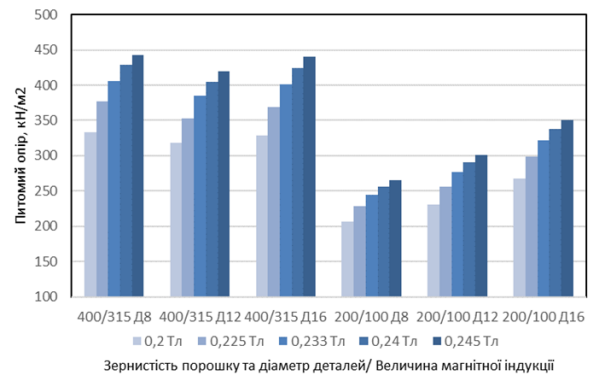
сила тиску більша ніж при обробленні порошком Полімам-Т (на 10-30%). Це може бути зумовлено більшою намагніченістю частинок МАІ сформованого з порошку Полімам-М (на 10% у порівнянні з Полімам-Т), що зумовлює більш суттєві магнітні зв'язки між часточками МАІ [2]. Додатково, порошок Полімам-М має більші (на 40% у порівнянні з Полімам-Т) значення внутрішнього тертя в парі МАІ-МАІ, що також може зумовлювати такі результати [2]. 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 [76].

4.2 Залежність значень питомого опору зі сторони МАІ при МАО від розмірів деталей та технологічних умов

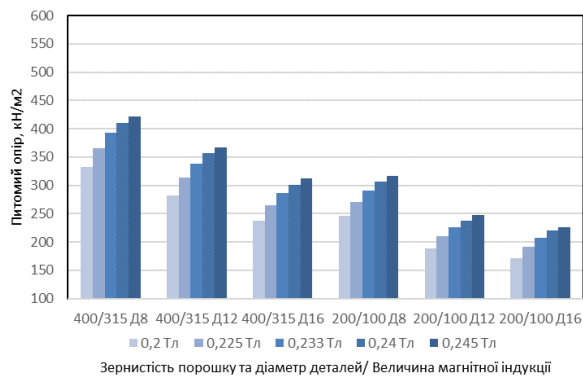
Для того, щоб розглянути вплив розмірів оброблюваної деталі та факторів оброблення на поведінку МАІ в робочій зоні було проведено дослідження питомого опору що діє на деталь під час оброблення. Для цього отримані в цьому експерименті значення було перераховано з виключенням з них поперечного перерізу деталі, таким чином стало можливо дослідити поведінку МАІ під час оброблення замість безпосереднього впливу зміни розмірів деталі на силу опору. Через незначний вплив швидкості руху деталі було вирішено врахувати усереднене значення для всіх значень швидкості. Результируючі гістограми залежності питомого опору від магнітної індукції, розміру деталей та розміру порошку представлені на рис. 4.9. Встановлено, що питомий опір завжди залежить від величини магнітної індукції, тобто збільшення величини магнітної індукції призводить до збільшення величини питомого опору. Це пояснюється тим, що магнітна індукція детермінує жорсткість МАІ, що прямо впливає на опір руху деталі зі сторони МАІ.



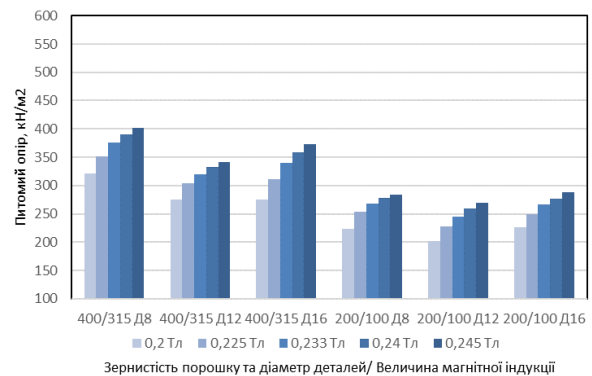
а



б



в



г

Рис. 4.9. Значення питомого тиску при МАО деталей різного розміру а – Деталі з титану VT8 оброблені порошком Полімам-М, б – сталі 40X13 порошком Полімам-М, в – титану VT8 порошком Полімам-Т, г – сталі 40X13 порошком Полімам-Т.

Також зберігається пряма залежність між збільшенням розміру зерен порошку та збільшенням величини питомого опору. Це зумовлено збільшеним зусиллям опору руху деталі при інших рівних умовах. Також результати вказують на вищі значення питомого опору при обробленні порошком Полімам-М, причиною цього є більша щільність цього порошку у порівнянні з порошком Полімам-Т, а також більша магнітна проникливість, що сприяє підвищенню ефекту дії магнітної індукції.

У проведених дослідженнях незалежно від матеріалу, розміру деталі, типу та розміру порошку спостерігається значна різниця між впливом магнітної індукції та швидкості руху на величину питомого опору, а саме значно

більший вплив індукції у порівнянні зі швидкістю. Проте, у більшості досліджень при малих значеннях індукції (0,2-0,22Тл) існує достатній вплив швидкості на величину питомого тиску. Дане явище найкращим чином відображено на графіку питомого опору при обробленні зразку 12 мм з титану BT8 при обробленні порошком Поліам-Т 200-100 мкм (рис. 4.10) 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 [76].

Пояснення також можна знайти у особливостях середовища МАІ яке прийнято вважати бінгамовським. Бінгамовськими середовищами називають такі, що мають поведінку твердого пластичного тіла до певної точки зсуву, та поведінку рідини (утворення течії середовища) після. Припустимо, що точка зсуву для МАІ прямо залежить від величини магнітної індукції як прямої характеристики жорсткості МАІ. При низьких значеннях індукції (0,2-0,22Тл) (низькій жорсткості) ця точка знаходиться в зоні низьких зусиль. Тому поведінка середовища МАІ при малих величинах магнітної індукції схожа з поведінкою рідини. Звідси і прямий вплив швидкості оброблення на питомий опір аналогічний до закономірностей гідравліки. При високих значеннях магнітної індукції точка зсуву знаходиться в зоні високих зусиль, тому для переходу МАІ від твердо-пластичного до рідкого стану, тобто зсуву середовища, необхідна значно більша швидкість оброблення [77]. При експериментальних швидкостях та технологічних умовах ця точка залишається недосягнутою, тому в даному дослідженні оброблення при високих значеннях магнітної індукції (більше 0,22 Тл) визначає поведінку МАІ як твердого середовища [76].

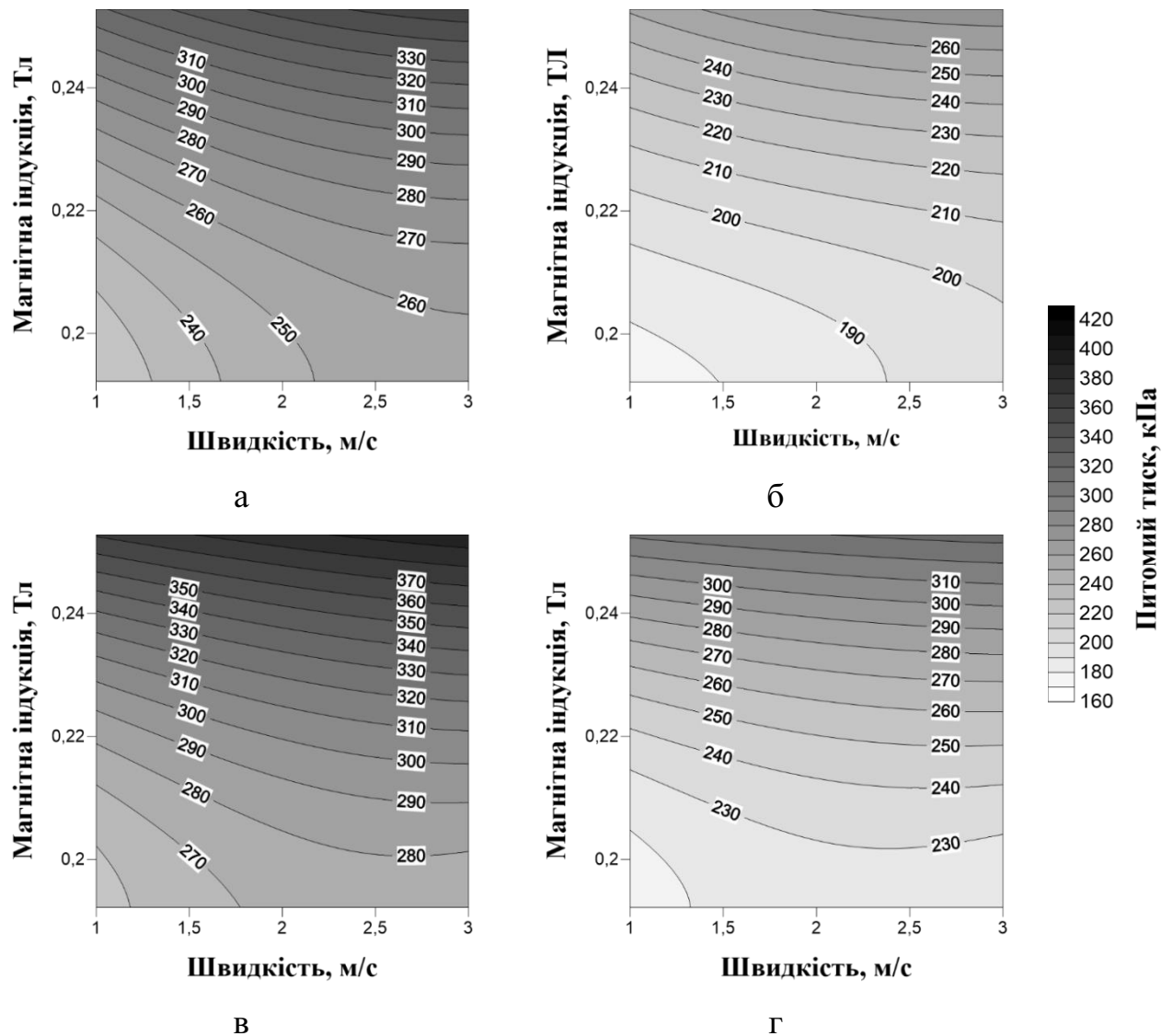
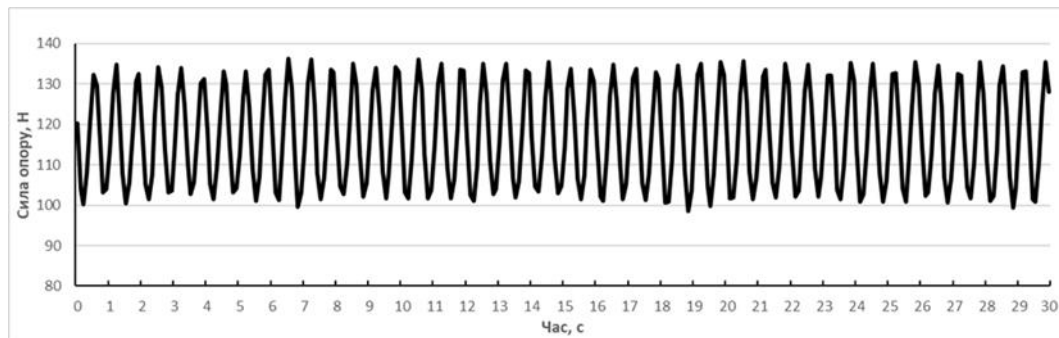


Рис. 4.10. Графік залежності питомого опору від швидкості руху та магнітної індукції для зразку 8 мм (а, в) та 12 мм (б, г) з титану ВТ8 при обробленні порошком Полімам-Т (а, б) та Полімам-М (в, г) з зернистістю 200-100 мкм [76].

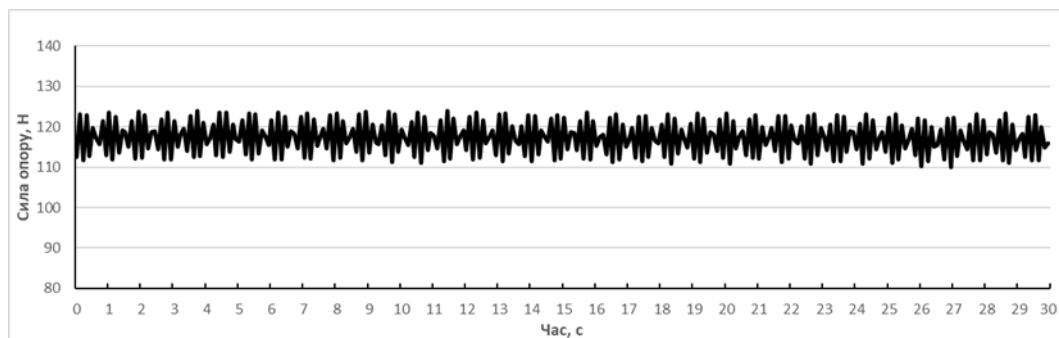
4.3 Опосередкований вплив швидкості оброблення на силу опору

Ще одним непрямим фактором впливу швидкості на сили опору при обробленні та на процес МАО загалом є вплив швидкості на точність отриманих даних. Данні, отриманні з датчика у ході експерименту, представляють собою періодичні функції, що мають мінімальні та максимальні значення. Характерні графіки таких функцій показано на рис. 4.11. Такі значення можуть вказувати на діапазон точності при зчитуванні даних, або ж на додаткові процеси та явища, що виникають при МАО. Цими явищами можуть

бути оновлення порошку, перебудова структурних формувань МАІ пондеромоторні сили та ін [2, 76].



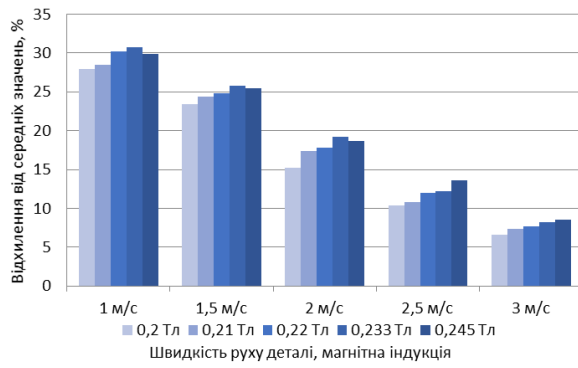
а



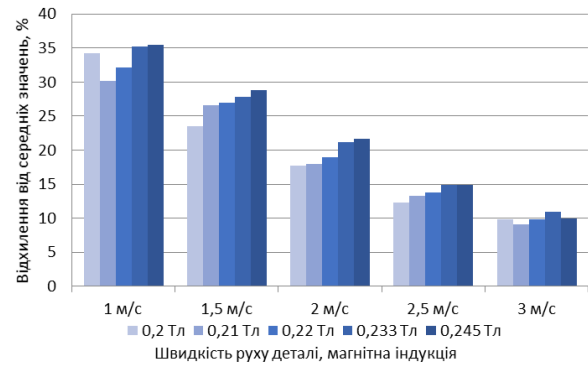
б

Рис. 4.11. Періодичні функції зміни сили опору від тривалості оброблення при МАО деталі діаметром 12 мм зі сплаву ВТ8 за допомогою порошку Полімам-М 400/315мкм зі швидкістю а) – 1 м/с, б) – 3 м/с [76]

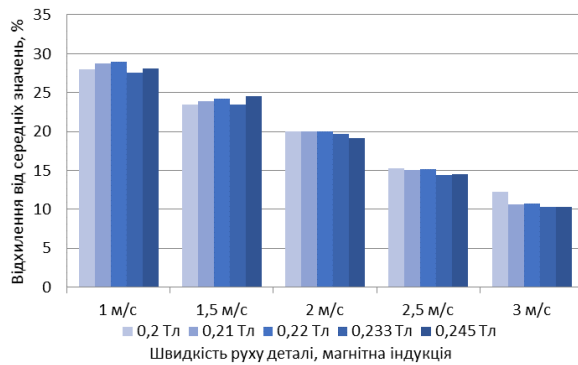
Також було проведено перерахування різниці мінімальних та максимальних значень відносно середнього значення, що використовувалося для попередніх досліджень. На рис. 4.12 зображено характерні гістограми відсоткового відхилення відносно середнього значення сили опору, головною тенденцією, спільною для всіх є тільки вплив від швидкості руху деталі в МАІ. Всі інші фактори (матеріал, розмір деталі, марка, розмір порошку) не мають впливу на це відхилення або мають обмежений і майже несуттєвий вплив (величина магнітної індукції). На малих швидкостях різниця максимальних і мінімальних значень сягає 30-35% від середнього значення сили опору, це може або суттєво вплинути на точність дослідження, або вказати на невідомі до цього процеси та явища, що мають місце при МАО [76].



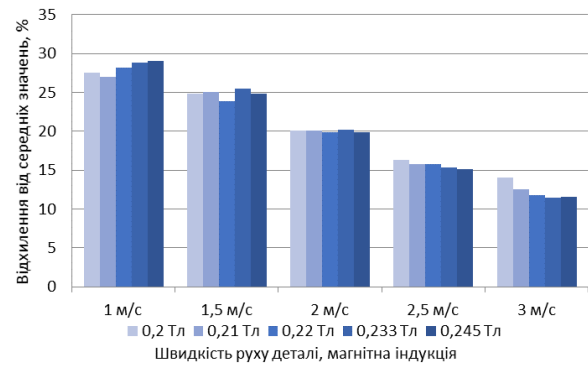
а



б



в



г

Рис. 4.12. Характерні графіки відсоткового відхилення відносно середнього значення сили опору при обробленні титанового сплаву BT8 порошком Полімам-Т 200/100 мкм деталь діаметром 8 мм (а) та 16 мм (б), а також при обробленні Сталі 40X13 Полімам-М 400/315 мкм деталь діаметром 8 мм (в) та 16 мм (г) [76].

Таку тенденцію можна назвати стабілізацією процесу MAO на великих швидкостях обробки. В роботі [2] зазначено залежність числа Рейнольдса від швидкості руху в середовищі МАІ. Встановлено, що малі швидкості сприяють високим числам Рейнольдса, тобто створенню турбулентних режимів течії МАІ, що створюють нестабільності зокрема в величині сили опору [2, 76]. Також зазначені вище особливості бінгамовського середовища 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 [2, 76].

Проте вище зазначені явища прямо залежать від частоти запиту даних АЦП. Варто нагадати, що для цього дослідження було використано АЦП з частотою запиту 10 Гц. Для точного визначення причин цього явища необхідно провести окремі дослідження з використанням обладнання з більшою частотою запиту, що дозволить детальніше дослідити процеси коливання сили опору та виключити можливість виникнення похибок пов'язаних з можливостями обладнання, яке використовували.

4.4 Дослідження залежності сили опору з боку МАІ при обробленні тонкої деталі типу лопатка ГТД

У дослідженнях [2, 27, 55, 60, 61] показано, що ефективне оброблення лопаток ГТД та, як наслідок, опір руху деталі зі сторони МАІ на пряму залежить від швидкості оброблення. Зазначено, що при малих швидкостях оброблення перед оброблюваною лопаткою рухається маса порошку у вигляді веретеноподібних формувань, тобто часточки порошку практично не рухаються відносно оброблюваних поверхонь, що зумовлює мінімальне видалення матеріалу деталі. Також це створює ущільнену зону МАІ, що перешкоджає рухові деталі в робочій зоні, тобто присутні збільшені сили опору. Натомість оброблення при високих швидкостях характеризується розривом веретеноподібних формувань перед деталлю та, як наслідок, активною взаємодією часток МАІ з оброблюваними поверхнями [2, 27, 55, 60, 61]. Такі твердження суперечать даним отриманим у попередніх розділах, тому було вирішено детальніше дослідити вплив швидкості оброблення на силу опору при МАО з використанням тонкої деталі типу лопатка.

Для визначення нормальних сил при МАО тонкої деталі було використано методику дослідження нормальної складової сил, що діють на деталь з боку МАІ викладену в розділі 2. Зразками, що брали участь в експерименті були тонкі лопатки ГТД товщиною 1 мм, висотою 35 мм (рис. 4.13). Зразки виготовлені з сплаву титана ВТ-18. Швидкість руху лопаток в

робочій зоні змінювали в діапазоні 1 – 3,5 м/с, а індукцію магнітного поля в межах 0,2 – 0,25 Тл.

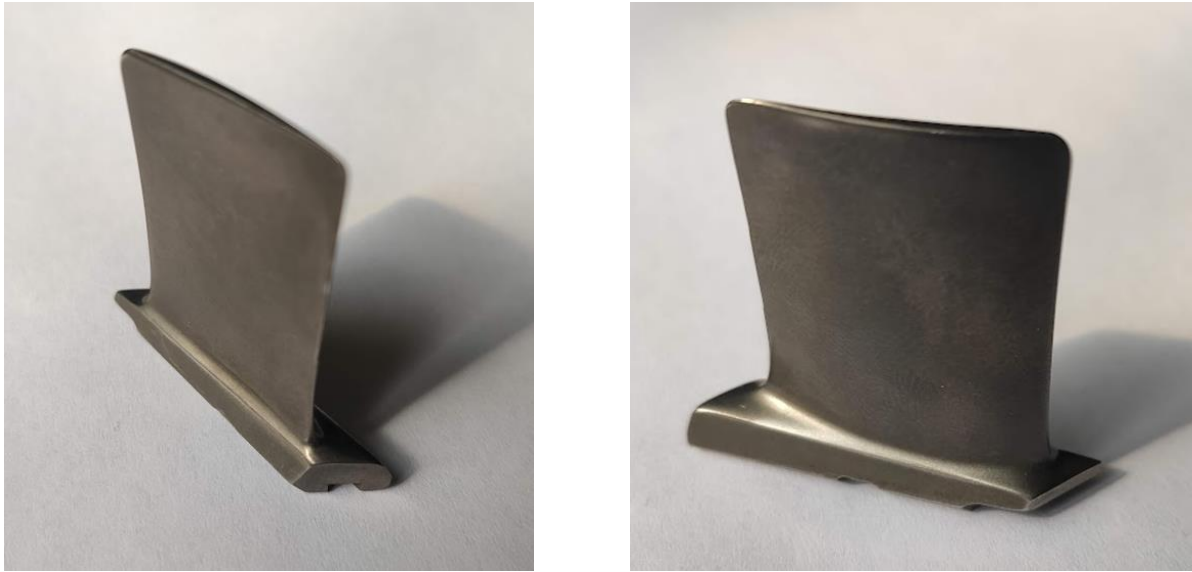


Рис. 4.13. Фотографії лопатки ГТД, що була використана у експериментальних дослідженнях

На рисунку 4.14 показано гістограми залежності сили опору від величини швидкості та магнітної індукції при обробленні тонкої деталі. Визначено, що оброблення тонкої деталі порошками з зернистістю 200/100 мкм (рис. 4.14 а, б) не має чіткого впливу швидкості оброблення на сили опору, вплив величини магнітної індукції залишається суттєвим, хоч і меншим ніж при обробленні циліндричних деталей діаметром 16 мм, а саме 150 Н/Тл. Натомість, оброблення цієї ж деталі порошками з зернистістю 400/315 мкм (рис. 4.14 в, г) вказує на інакший характер оброблення. Встановлено, що при швидкостях оброблення 3 – 3,5 м/с присутнє різке зниження сили опору (на 10 – 25%). Це підтверджує явища описані в роботах [2, 3, 27, 55, 60, 61]. Варто зазначити, що значення сили опору при МАО тонкої деталі суттєво менші ніж при обробленні більших деталей з попередніх розділів.

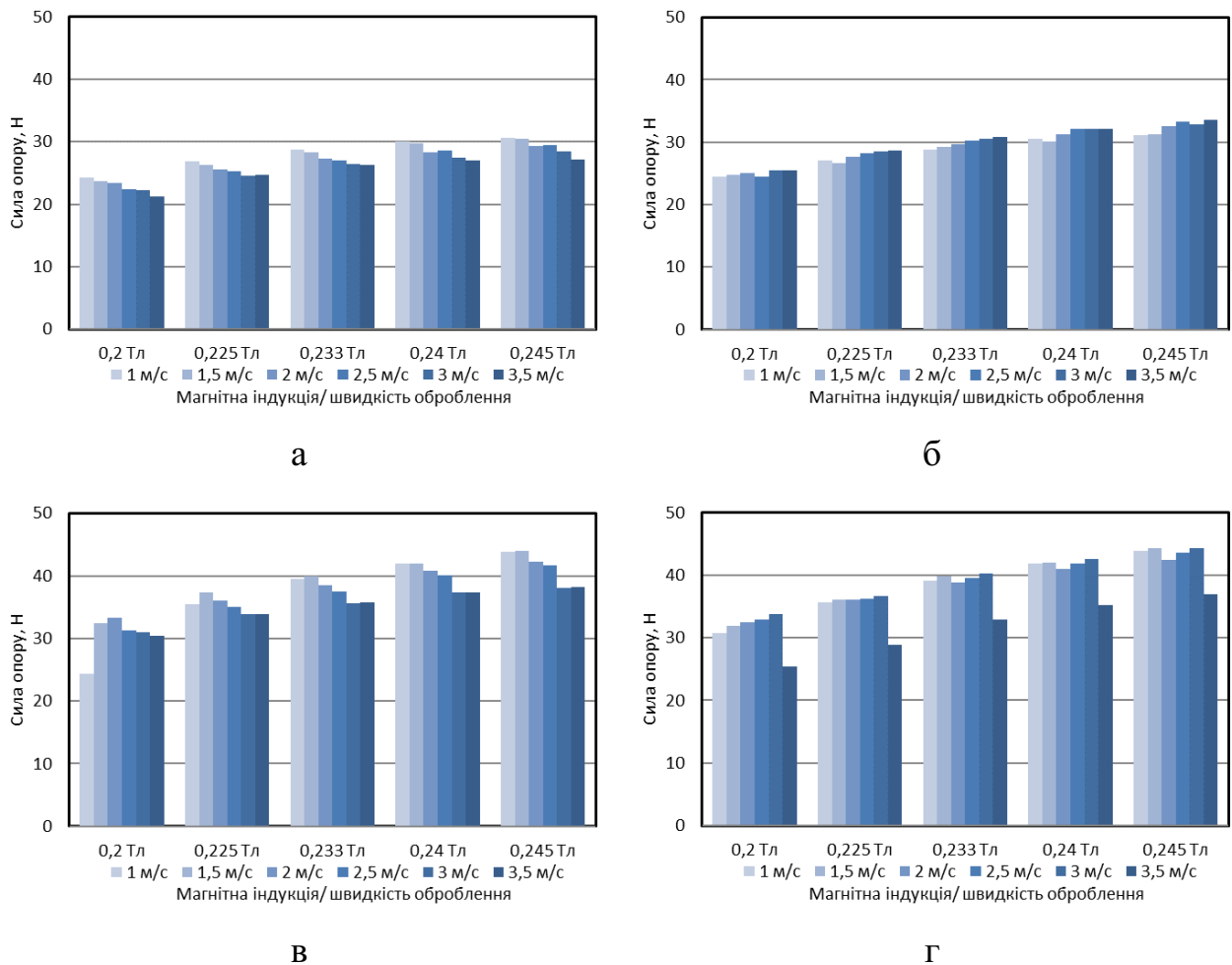


Рис. 4.14. Залежність сили опору від величини магнітної індукції та швидкості оброблення при МАО лопатки ГТД порошками Полімам-Т 200/100 (а) 400/315 (в) мкм та Полімам-М 200/100 (б) 400/315 (в) мкм

Для кращого пояснення явища розриву веретеноподібних утворень МАІ необхідно розглянути поведінку порошку в зоні перед деталлю. Схематично поведінка часток МАП показана на рис. 4.15. Ймовірно, дрібні зерна МАП фракції 200/100 мкм можуть затримуватися на торці оброблюваної деталі (через суттєву різницю в їх розмірах), це зумовлює ущільнення МАІ та як наслідок збільшення магнітних сил, що з'єднують частки порошку між собою (рис. 4.15 а). Такі ущільнені зони запобігають розриву веретеноподібних формувань порошку (показано штриховою лінією), та утримують стабільно високі значення сили опору, зокрема і через збільшення магнітних сил, що з'єднують часточки порошку між собою. Натомість, частки порошку з зернистістю

400/315 мкм (рис. 4.15 б) не схильні до затримки значної маси порошку на торці оброблюваної деталі, через відносно великий розмір зерен у порівнянні з торцем деталі. Такий характер розміщення зерен сприяє явищу розриву веретеноподібних утворень (показано штриховою лінією) порошку при високих швидкостях оброблення, та, як наслідок, сприяє різкому падінню сил опору зі сторони МАІ. Це фактично підтверджує наведений в роботах [2, 3, 27, 55, 60, 61] руйнування веретеноподібних утворень з порошку, які формуються в середній частині зазору перед деталлю при високих швидкостях. Варто також зазначити, що найбільш активно це явище спостерігається при МАО з використанням порошку Поліам-М (рис 4.14 в). Це може бути зумовлено округлою формою зерен такого порошку, що зумовлює менше заклинювання між часточками порошку у порівнянні з оскольчастим порошком, що в свою чергу сприяє зриву часток порошку з поверхні деталі та руйнування веретеноподібних утворень шляхом роз'єднання часток порошку між собою.

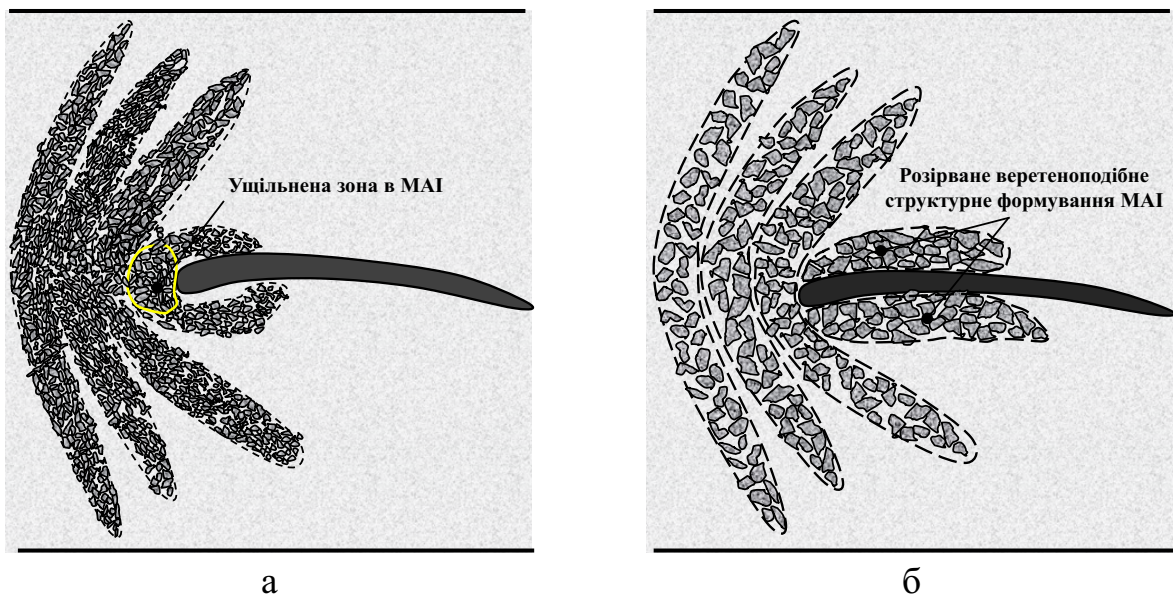
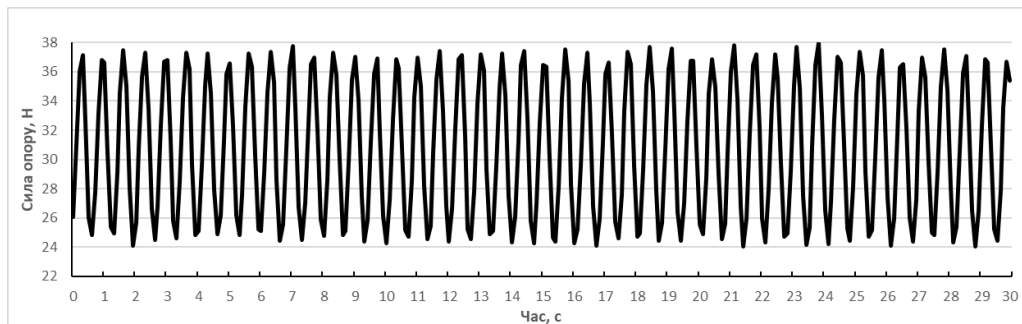


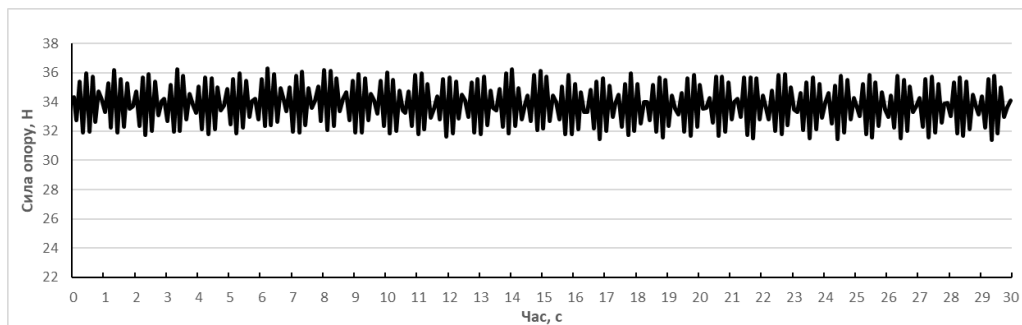
Рис. 4.15. Схематичне представлення взаємодії веретеноподібних формувань в МАІ сформованого з дрібнозернистих (а) та крупнозернистих (б) порошків при МАО тонкої деталі типу лопатка компресора ГТД

Аналогічно до циліндричних деталей, було проведено дослідження мінімальних та максимальних значень сили опору зафіксованих обладнанням.

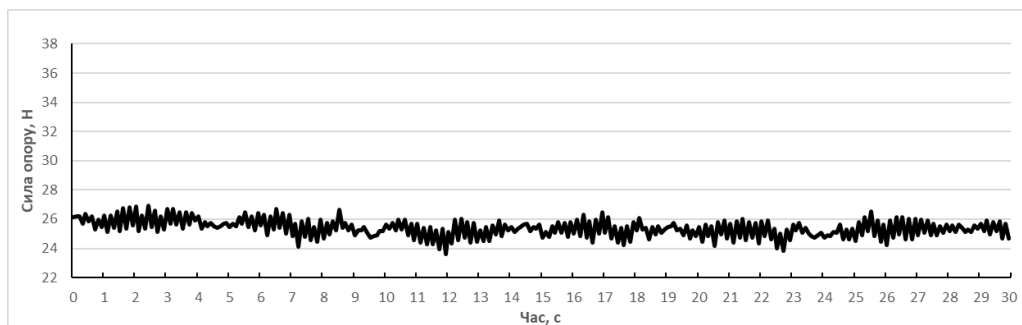
Визначено (рис. 4.16), що відхилення максимальних та мінімальних значень співставне з такими відхиленнями при МАО циліндричних деталей, тобто збільшення швидкості оброблення призводить до стабілізації процесу МАО (зменшення різниці максимальних та мінімальних значень). Відсоткове значення різниці максимальних та мінімальних значень відносно середнього значення сили опору при малих швидкостях оброблення сягало 35 – 45 %, при високих 10 – 15 %.



а



б



в

Рис. 4.16. Зміна величини сил лобового опору у процесі МАО при обробленні тонкої деталі за допомогою порошку Поліам-М 400/315мкм зі швидкістю а) – 1 м/с, б) – 3 м/с, в) – 3,5 м/с.

Отже, тенденції в зміні різниці мінімальних та максимальних значень не змінні при будь-яких умовах оброблення та будь-яких розмірів оброблюваної деталі. Різниця мінімальних та максимальних значень спадає при збільшенні швидкості руху деталі в робочій зоні. Це може бути викликано специфічними властивостями середовища МАІ як Бінгамівського (поведінка твердого тіла до точки зсуву та рідкого після), а також переходу течії середовища з турбулентної в ламінарну зі збільшенням швидкості руху [2].

Це дослідження підтвердило показані у роботах [2, 3, 27, 55, 60, 61] особливості при обробленні тонких деталей, а саме розрив веретеноподібних утворень МАІ на високих швидкостях оброблення і його прямий вплив на ефективність оброблення та силову взаємодію деталі та МАІ. Визначено, що вплив швидкості оброблення на силу опору руху деталі з боку МАІ, присутній при відносно високих швидкостях оброблення та відносно малих розмірах деталі.

4.5 Висновки

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.

Встановлено пряму залежність величини сили опору від розміру зерен магнітно-абразивного порошку (МАП). Тобто збільшення величини сили опору в 2 рази відповідає збільшенню середнього розміру частки порошку у 2 рази.

Також встановлено різницю в обробленні порошками Поліам-М та Поліам-Т (сила опору при обробленні порошком Поліам-М на 10 – 30 % більша ніж при обробленні порошком Поліам-Т), зумовлену відмінними показниками намагніченості та внутрішнього тертя в парі МАІ-МАІ.

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). Через вплив відмінності характеру

оброблення різними структурними елементами МАІ на силу опору (для даних умов експерименту).

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 %.

Підтверджено показані у роботах [2, 3, 27, 60, 61] особливості при обробленні тонких деталей, а саме розрив веретеноподібних утворень МАІ на високих швидкостях оброблення і його прямий вплив на ефективність оброблення та силову взаємодію деталі та МАІ.

Розглянуто причини та наслідки періодичних коливань сили опору та вплив технологічних параметрів на величину цих коливань. Визначено, що періодичні коливання залежать від характеру при різних швидкостях оброблення. При збільшенні швидкості оброблення з 1 до 3,5 м/с відбувається зменшення коливань з 40% до 15% відносно середнього значення сили опору.

РОЗДІЛ 5

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ФОРМИ ОБРОБЛЮВАНОЇ ДЕТАЛІ НА СИЛИ ПРИ МАО

Наступний етап дослідження полягав у визначенні особливостей формування середовища МАІ через вплив зміни форми та положення оброблюваних деталей.

Для визначення сил опору в залежності від форми деталі було використано методику дослідження сил опору руху деталі з боку МАІ викладену в розділі 2. Зразками, що брали участь в експерименті були циліндричні квадратні та трикутні призми з характерним розміром (діаметром та довжиною сторони) 8, 12, та 16 мм, висотою 30 мм з феромагнітної сталі 40Х13 та парамагнітного сплаву титану ВТ8 (рис 2.4 б). Квадратні та трикутні деталі розташовувалися як гранню так і ребром у бік руху деталі (рис. 5.1).

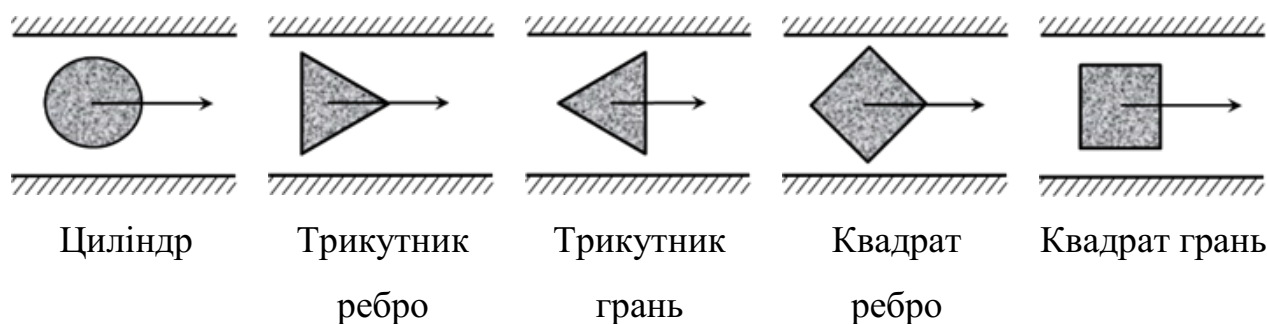


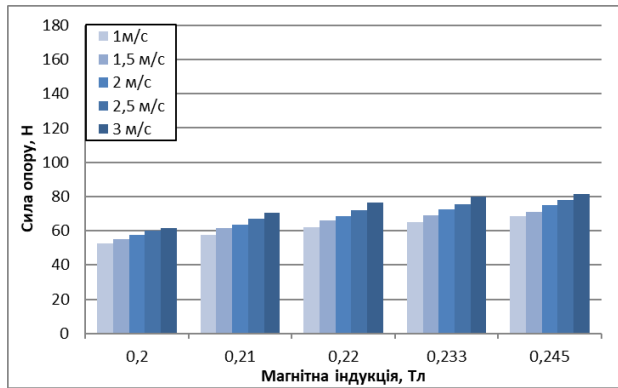
Рис. 5.1. Форми деталей та їх орієнтація при обробленні[78, 79]

Швидкість руху деталей в робочій зоні змінювалась в діапазоні 1 – 3 м/с, а магнітна індукція від 0,1 до 0,25 Тл.

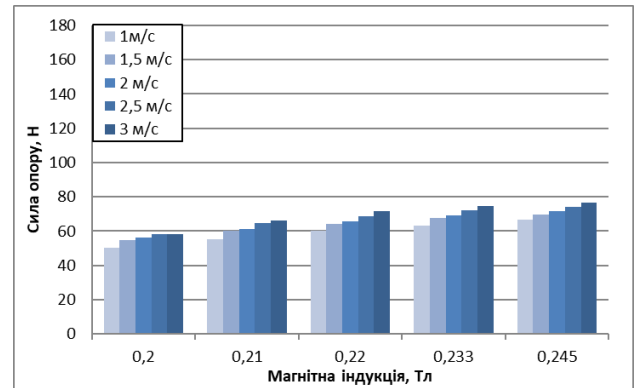
5.1 Результати дослідження впливу форми оброблюваної деталі на силу опору

Отримані експериментальні данні було представлено у вигляді гістограм залежності сили опору від швидкості оброблення та величини магнітної індукції. На рис. 5.2 зображено характерні гістограми для оброблення квадратних деталей різних розмірів з пара- та феромагнітного матеріалу при використанні порошку Поліам-Т з зернистістю 200/100 мкм. Встановлено, що швидкість руху деталі в робочій зоні практично не впливає на силу опору проте

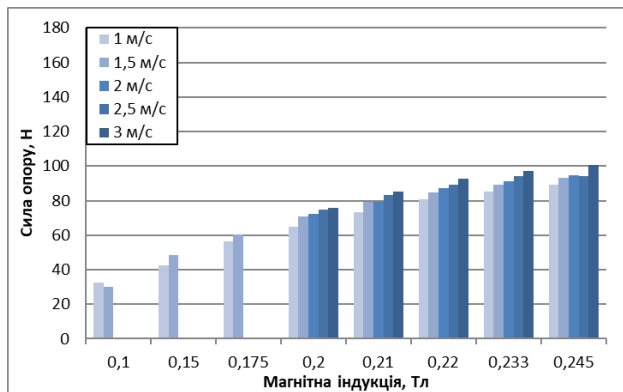
величина магнітної індукції впливає суттєво (аналогічно до результатів попередніх розділів).



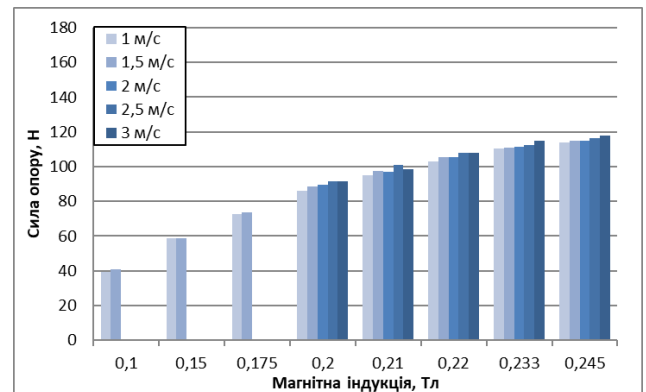
а



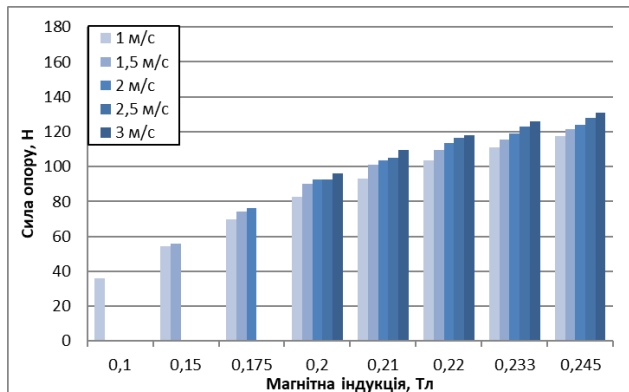
б



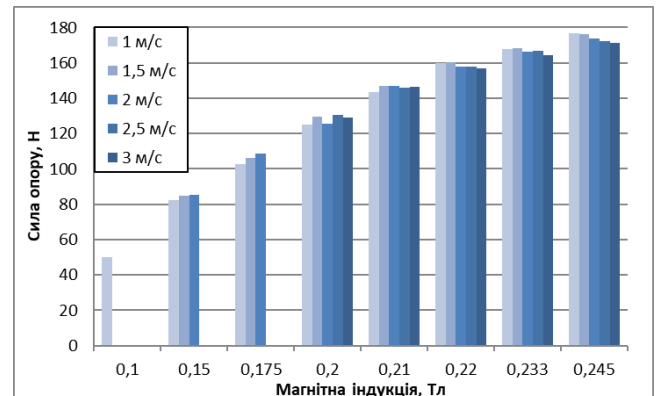
в



г



д



е

Рис. 5.2. Гістограми залежності сил опору від швидкості оброблення та величини магнітної індукції при обробленні 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.

З огляду на стабільний лінійний вплив магнітної індукції на силу лобового опору було запропоновано представляти цей вплив у вигляді лінійної функції сили лобового опору (5.1).

$$F_{\text{оп}} = R_B \cdot B + F_0 \quad 5.1$$

Де B – величина магнітної індукції в робочому зазорі, F_0 – сила лобового опору при $B=0$ Тл, R_B – параметр, якій показує вплив величини магнітної індукції – B на силу лобового опору $F_{\text{оп}}$. В таблицях 5.1 та 5.2 показано значення цього параметру перерахованого відносно площі міделевого перерізу деталі за формулою 5.2:

$$r_B = R_B / S \quad 5.2$$

Де, S – площа міделевого перерізу деталі [79].

Таблиця 5.1. Параметр впливу величини магнітної індукції на силу лобового опору при обробленні порошком Полімам-М [79]

Характерний розмір зразка, мм	Форма і базування деталі при МАО	Розмір частинок МАП, мкм	Магнітні властивості матеріалу зразка	
			магнітний	немагнітний
			r_B , МПа/Тл	r_B , МПа/Тл
8	Циліндр	200/100	1,1	1,33
		400/315	1,68	1,98
	Квадрат грань	200/100	1,16	1,32
		400/315	1,8	1,92
12	Циліндр	200/100	1,14	1,16
		400/315	1,53	1,63
	Квадрат грань	200/100	1,23	0,96
		400/315	1,74	1,38
	Квадрат ребро	200/100	1,19	0,84
		400/315	1,36	1,27
16	Циліндр	200/100	1,39	1,04
		400/315	1,63	1,4
	Квадрат грань	200/100	1,58	1,41
		400/315	1,96	1,46
	Квадрат ребро	200/100	1,4	1,04
		400/315	1,49	1,44
	Трикутник ребро	200/100	1,16	1,02
		400/315	1,48	1,35
	Трикутник грань	200/100	0,92	1,02
		400/315	1,24	1,25

Встановлено, що для оброблення магнітних деталей порошком Полімам-М значення параметру r_B вищі ніж при обробленні парамагнітних через суттєвий вплив магнітних властивостей деталі на явище притягування частинок МАП до деталі та локальне збільшення індукції магнітного поля (розділ 3). Винятком є оброблення деталей з характерним розміром 8 мм де значення параметру впливу для немагнітної деталі є більшим ніж для магнітної. Пояснюється це виникненням пондеромоторних сил при взаємодії відносно малих феромагнітних деталей з веретеноподібними утвореннями МАІ (детальніше описано в розділі 4). При обробленні з використанням порошку Полімам-Т (табл. 5.2) спостерігаються схожі залежності.

Таблиця 5.2. Параметр впливу величини магнітної індукції на силу лобового опору при обробленні порошком Полімам-Т [79]

Характерний розмір зразка, мм	Форма і варіант базування при МАО	Розмір частинок МАП, мкм	Магнітні властивості матеріалу зразка	
			магнітний	немагнітний
			r_B , МПа/Тл	r_B , МПа/Тл
8	Циліндр	200/100	1,12	1,23
		400/315	1,57	1,6
	Квадрат грань	200/100	1,18	1,23
		400/315	1,66	1,51
12	Циліндр	200/100	1	0,93
		400/315	1,25	1,37
	Квадрат грань	200/100	1,24	1,02
		400/315	1,42	1,25
	Квадрат ребро	200/100	1,1	0,84
		400/315	1,3	1,04
16	Циліндр	200/100	1,09	0,86
		400/315	1,33	1,04
	Квадрат грань	200/100	1,43	1,06
		400/315	1,77	1,39
	Квадрат ребро	200/100	1,39	1,12
		400/315	1,5	1,34
	Трикутник ребро	200/100	1,02	1,03
		400/315	1,31	1,04
	Трикутник грань	200/100	0,87	0,88
		400/315	1,25	1,24

Варто зазначити, що значення параметру r_B при обробленні порошком Поліам-М дещо вищі ніж при обробленні порошком Поліам-Т через більші значення магнітної проникливості для округлого порошку [2].

Для подальшого розгляду впливу форми оброблюваної деталі на сили, що діють зі сторони МАІ було вираховано різницю значень сили лобового опору між кожною парою форм деталей одного матеріалу (при однаковому розмірі міделевого перерізу деталі). Порівняння результатів показало, що різниця в значеннях сили опору для циліндричних, трикутних та квадратних деталей не має чітких закономірностей та загалом становить не більше 3 – 15%, такими відмінностями можна знехтувати при розгляді сили опору та особливостей формування МАІ. На рис. 5.3 показано різницю сил опору між квадратною та циліндричною та між трикутною та циліндричною деталлю при зміні величини магнітної індукції та марки/зернистості МАІ.

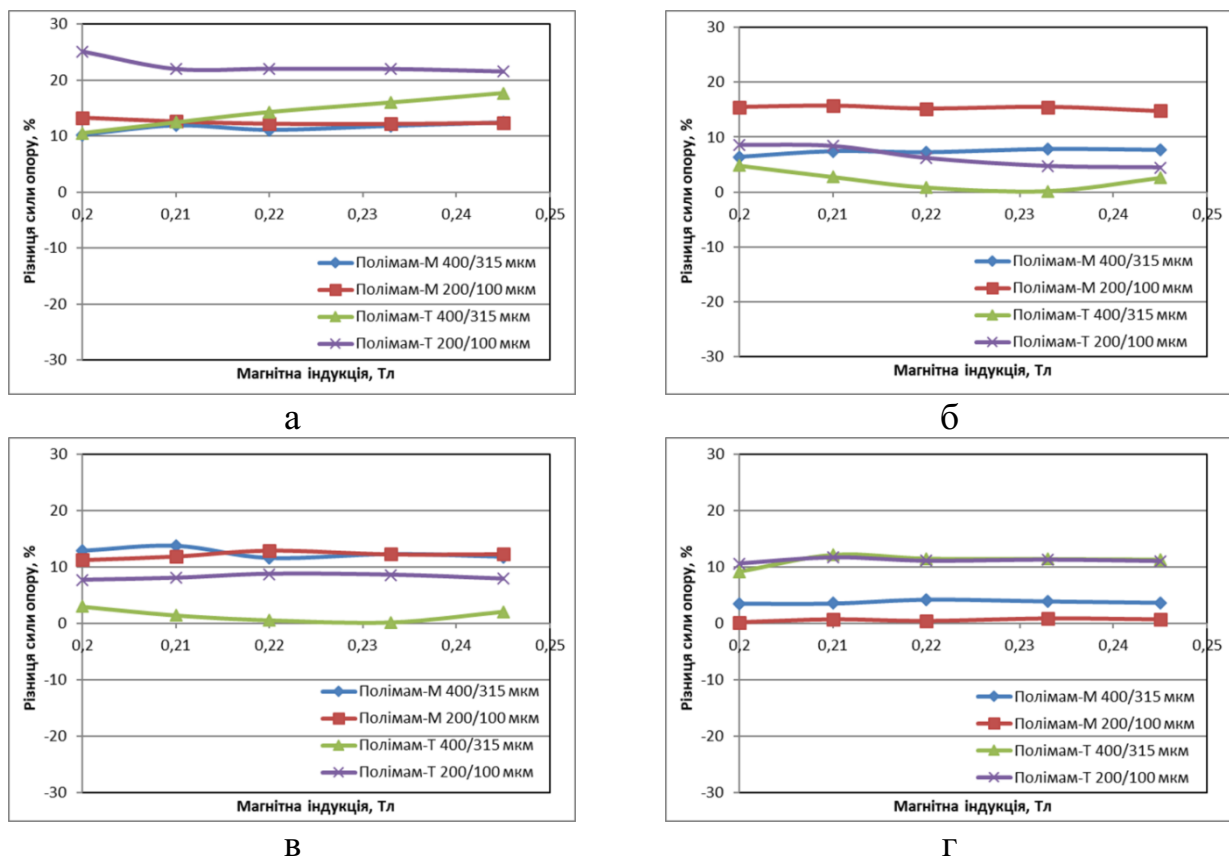


Рис. 5.3. Різниця у величинах сил опору, що діють з боку МАІ при попарному порівнянні квадратної та циліндричної деталі розміром 12 мм (а, в) та трикутної та циліндричної розміром 16 мм (б, г) для сталі 40Х13 (а, б) та титану ВТ8 (в, г).

Винятком з цього була різниця сил опору при обробленні сталевих деталей розміром 16 мм. Так різниця сил опору між феромагнітними деталями різних форм становить від 20 до 70 % особливо відчутно відрізняється сила опору при обробленні квадратної деталі, що розташовувалася гранню у напрямку руху деталі (на 50 – 70% більша сила опору у порівнянні з іншими формами). Пояснення такого явища можна знайти у візуальному аналізі вигляду МАІ під час оброблення (рис. 5.4). Так, це явище пов'язано з суттєвим 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 [78]. Розміри цієї ущільненої зони залежать від близькості поверхні феромагнітної деталі до полюсних наконечників (при обробленні деталей 12 та 8 мм це явище практично відсутнє) та відносних розмірах бокових поверхонь деталей оскільки оброблення квадратної деталі (рис. 5.4 а) зумовлює найбільшу зону ущільнення у порівнянні з іншими зразками експерименту. Встановлено, що розмір ущільнених зон корелюється з величиною сили опору. Так найменші значення сили опору мають місце при обробленні трикутної деталі розташованої плоскою стороною в напрямку руху (рис. 5.4 в) і становлять 80 – 150 Н. При обробленні циліндра (рис. 5.4 б) і трикутника розташованого ребром у напрямку руху (рис. 5.4 г) значення сили опору більші на близько 20%. Оброблення квадратної деталі зумовлює найбільше розширення мертвої зони та найбільшу силу опору. Також на фотографіях показано, що МАП охоплює деталь і взаємодіє зі зворотною стороною деталі, що додатково може збільшувати зону ущільнення та збільшувати явище заклинювання МАП, що в свою чергу збільшує силу опору. Особливо таке явище проявляється на циліндричній деталі (рис. 4 б) та на трикутній встановленій плоскою стороною при зустрічному руху деталі (рис. 4 в), форма тильної частини таких деталей забезпечує активне переміщення порошку за деталлю [78]. Дане явище є наглядним підтвердженням зазначеному в розділі 3 твердження про псевдозбільшення поперечного

перерізу феромагнітної деталі за рахунок її взаємодії з частинками МАП. Також це явище пояснює високі значення коефіцієнту r_B для функціональної залежності сили опору від величини магнітної індукції (табл. 5.1 – 5.2).

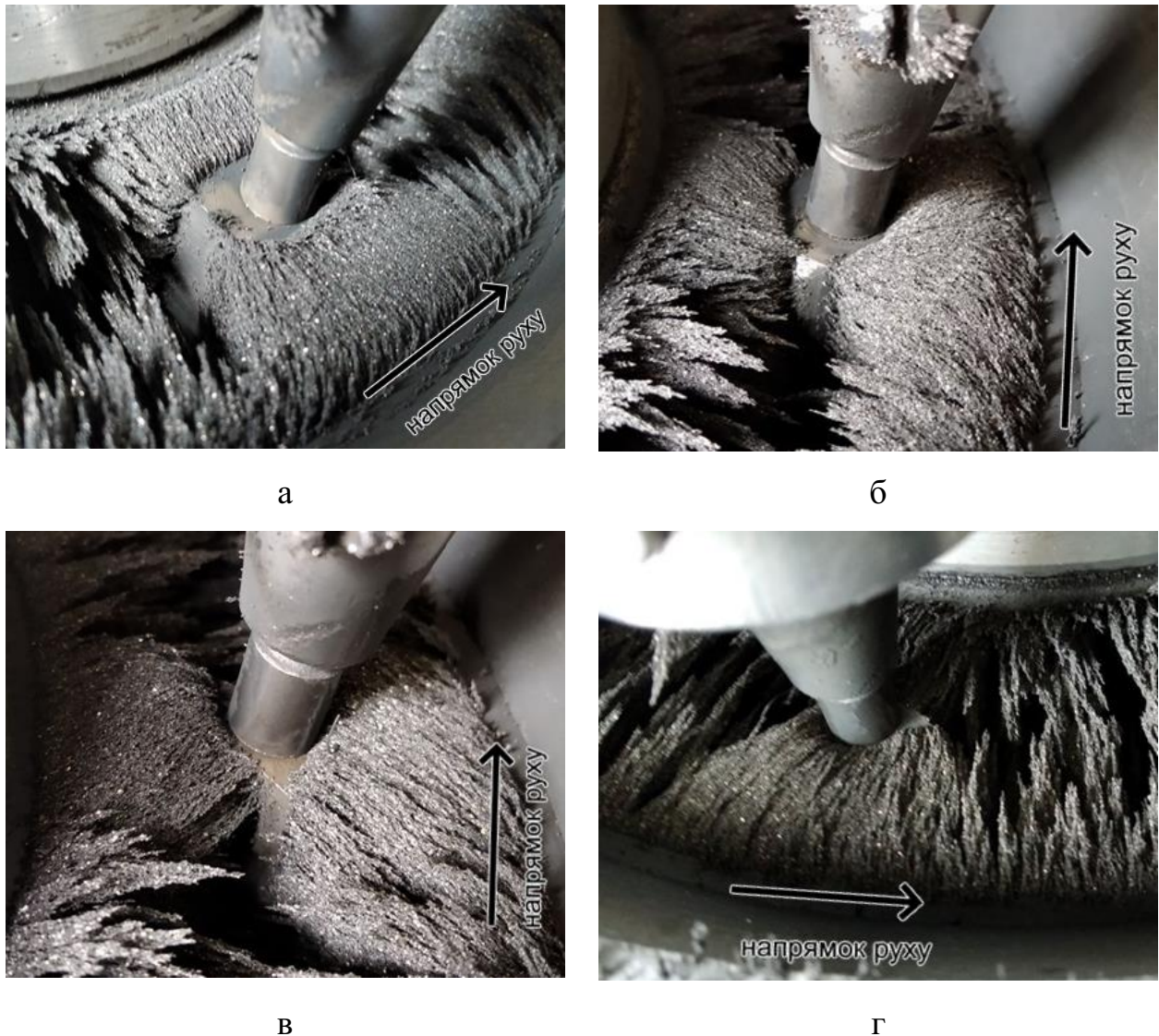


Рис. 5.4. Явище ущільнення формувань МАП між полюсними наконечниками та сталеву деталлю з характерним розміром 16 мм а – квадрат плоска сторона, б – циліндр, в – трикутник плоска сторона, г – трикутник гостра [78].

Такий характер процесу МАО феромагнітних деталей кардинально відрізняється від процесу оброблення парамагнітних деталей такого самого розміру та форми. Так на фотографіях рис. 5.5 показано відмінності у формуванні МАІ при обробленні квадратної феромагнітної деталі з характерним розміром 16 мм (рис. 5.5 а) та такої самої парамагнітної деталі (рис. 5.5 б). Аналогічна за формою та розміром парамагнітна деталь не створює

ущільнення формувань МАІ між поверхнею деталі (хоч і взаємодіє з Конусоподібними формуваннями) та полюсними наконечниками та не зумовлює суттєвого підвищення величини сили опору. Немагнітна деталь зумовлює скупчення порошку лише на фронтальній поверхні, переважно це скупчення і створює опір руху деталі в робочій зоні, тобто практично повністю формує силу лобового опору [78].

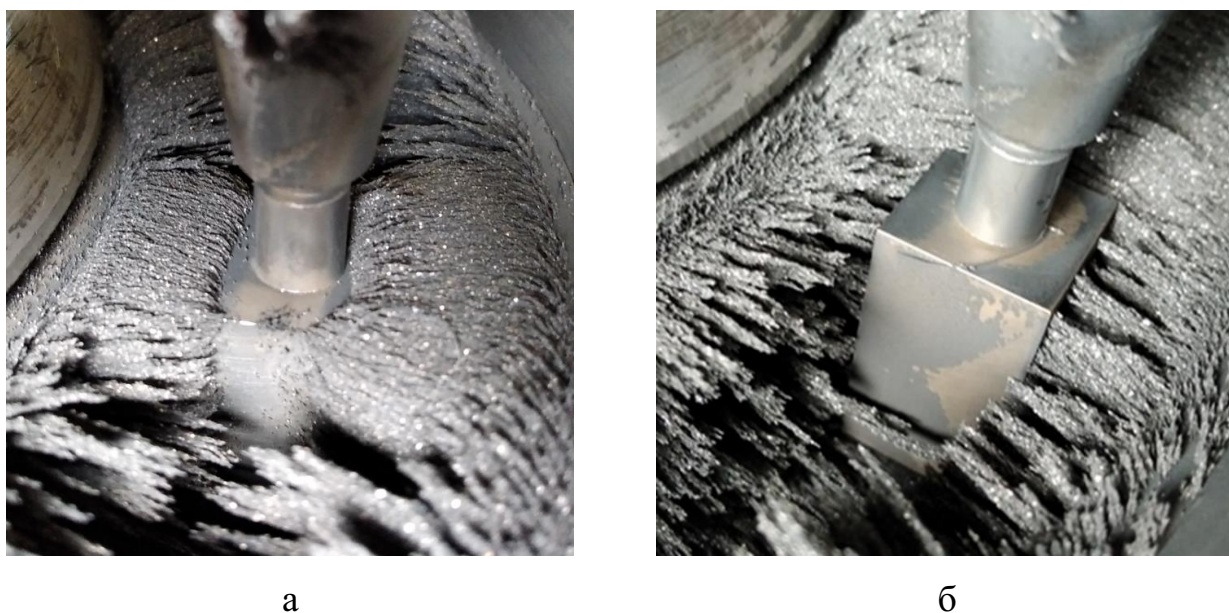


Рис. 5.5. Відмінності характеру оброблення феромагнітних (а) та немагнітних (б) деталей

Частинки магнітно-абразивного порошку мають властивість притягування до найбільш намагнічених частин робочої зони в процесі оброблення. У випадку оброблення феромагнітної деталі частинки порошку концентруються на поверхнях оброблюваної деталі та полюсних наконечників. Це схематично показано на рис. 5.6. а – формоутворення рухаються у напрямку намагнічених бокових поверхонь деталі (показано червоними стрілками), цей рух формувань у парі з магнітними властивостями деталі може зумовлювати виникнення пондеромоторних сил, які можуть створювати локальні зміни в магнітному полі (як збільшення магнітної індукції, так і зменшення). Натомість при обробленні парамагнітної деталі (рис. 5.6 б) формоутворення зміщуються до найбільш намагніченої частини робочої зони якою є полюсні наконечники та «мертві» зони. Немагнітна деталь має відмінний тип взаємодії з МАІ – сили

опору створюють тільки скупчення МАП на фронтальній частині деталі та несуттєві сили тертя бокових поверхонь деталі та Конусоподібних формоутворень,

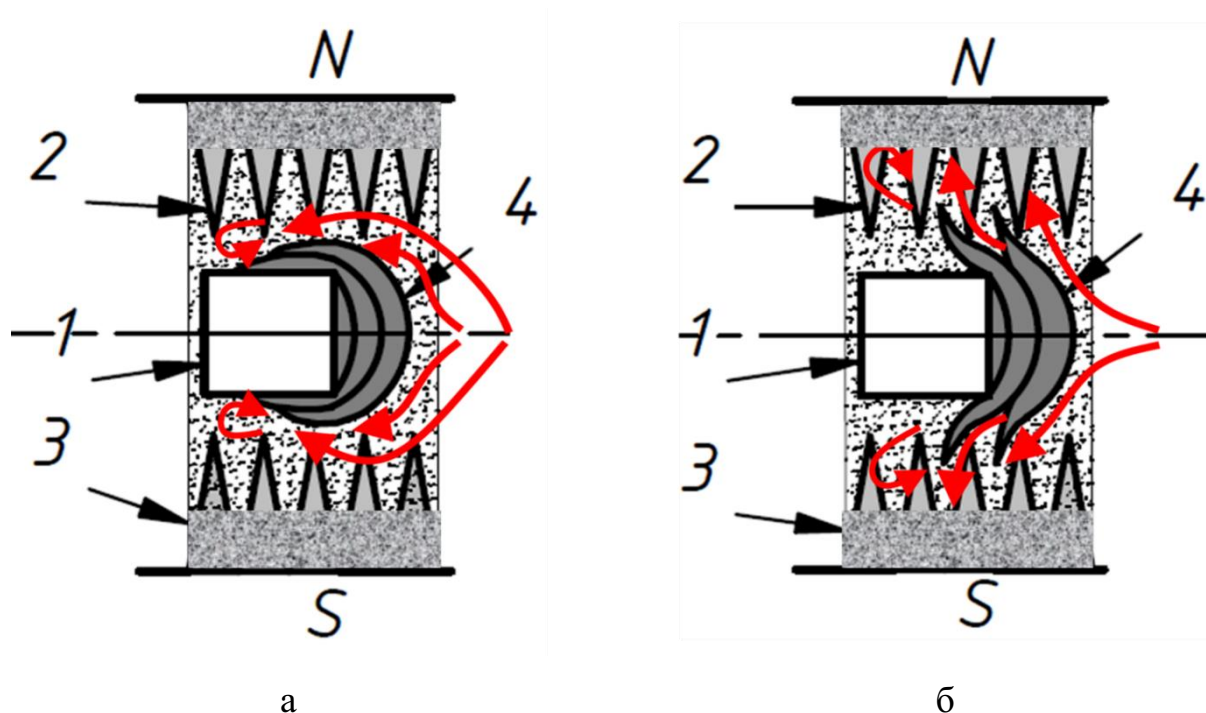


Рис. 5.6. Схема взаємодії феромагнітної – а, та парамагнітної – б деталей з МАІ.

1 – деталь, 2 – Конусоподібні формування, 3 – «мертві» зони, 4 – веретеноподібні формування.

Оскільки у цьому експерименті використовувалися деталі типу квадратна призма різних розмірів, було вирішено визначити вплив зміри розміру деталі для цієї форми. Для визначення впливу зміни розміру квадратної деталі було проведено відсоткове порівняння між силою опору квадратних деталей різного розміру аналогічно до порівняння циліндричних деталей у попередньому розділі. В табл. 5.2 представлено результати порівняння квадратних деталей зі сталі та титану де визначено приріст сили опору до приросту розміру деталі за 100% були прийняті значення сили опору отримані при обробленні деталей з характерним розміром 8 мм. Було перераховано значення сили опору для кожного типу порошку та представленого значення магнітної індукції, отримані значення для кожного розміру деталі було представлено у вигляді середнього, мінімального та максимального значень [78]. Встановлено, що зміна розміру

квадратної деталі викликає закономірності практично ідентичні до закономірностей при зміні розміру циліндричних деталей. Так, при обробленні титанових деталей квадратної форми збільшення розміру в 2 рази зумовлює збільшення сили опору в 1,5 разів. Таке явище викликане різною взаємодією деталей різних розмірів з структурними формуваннями МАІ, що пояснена в розділі 4. Для феромагнітної деталі збільшення розміру деталі в 1,5 рази зумовлює збільшення сили опору в середньому у 1,5 рази, проте збільшення розміру деталі з 8 до 16 мм призводить до збільшення сили опору в середньому у 2,3 рази. Це викликано описаним вище явищем розширення ущільненої «мертвої» зони МАІ при обробленні відносно великих феромагнітних деталей. Особливо це явище присутнє саме при обробленні квадратних деталей, натомість оброблення циліндричних феромагнітних деталей не характеризується настільки стрімким зростанням сили опору при збільшенні розміру деталі (табл. 4.2) [78].

Таблиця 5.2. Відсоткове відношення приросту сили лобового опору до приросту розміру квадратної деталі

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

З огляду на зазначене вище можна констатувати, що зміна форми оброблюваної деталі не має чіткого впливу на сили опору зі сторони МАІ, особливо у порівнянні з фактором зміни розміру деталі. Окремо варто розглядати оброблення феромагнітних деталей великих розмірів (відносно ширини робочої зони) так як наближення поверхонь феромагнітних деталей до «мертвих» зон МАІ та полюсних наконечників зумовлює явище ущільнення порошку, що є причиною значного зростання сил опору (особливо для деталі квадратної форми через відносно велику площу бокових поверхонь).

5.2 Питома сила опору при зміні форми оброблюваної деталі

З огляду на те, що сила опору практично не має залежності від зміни форми деталі було вирішено дослідити питому силу опору перераховану на площу поверхонь деталі, що зазнають безпосереднього тиску з боку середовища МАІ (ці поверхні представлені на рис. 5.7). 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 [78].

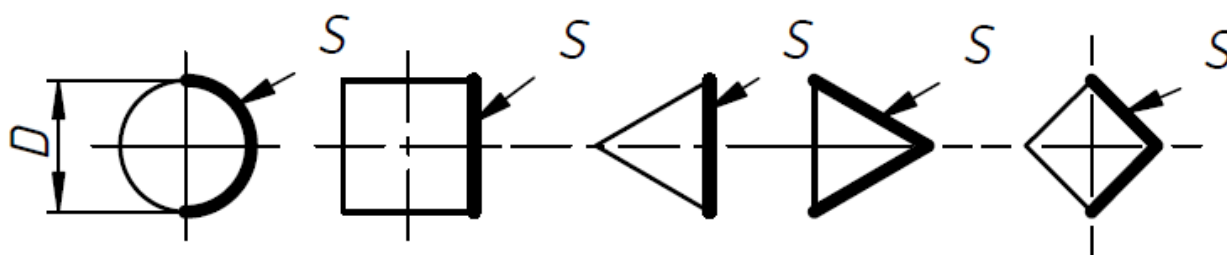


Рис. 5.7. Поверхні деталей, які зазнають безпосереднього тиску МАІ

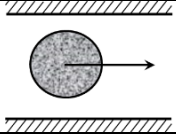
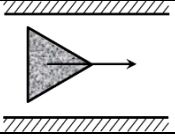
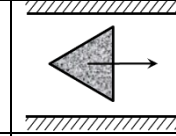
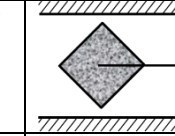
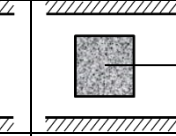
Отримані значення питомого опору суттєво відрізняються при зміні форми деталі, ці відмінності дозволяють визначити особливості формування середовища МАІ. Для цього через значення питомого опору було визначено співвідношення між кожною формою деталі (при однаковій площі поперечного перерізу деталі) шляхом попарного перерахування значень питомого опору між собою за формулою 5.3

$$k = P_i/P_j \quad 5.3$$

Де k – співвідношення між формами, P_i та P_j – значення питомої сили опору для двох деталей різних форм. Ці співвідношення були використані для перерахування значень питомого опору у коефіцієнт форми, максимальний коефіцієнт форми прирівнювався до 1, решта визначалася згідно співвідношення. Оскільки оброблення феромагнітних деталей великих розмірів (16 мм) суттєво відрізняється від оброблення немагнітних, коефіцієнт для феромагнітних деталей було перераховано через найменше значення, яке належало циліндричній деталі [78]. Такий вибір зумовлений тим, що вище зазначене явище розширення «мертвої» зони МАІ найменше спостерігалось на циліндричній деталі, тому саме для цієї форми можливо умовно прирівняти

коефіцієнти питомого опору для магнітних та немагнітних матеріалів. Проте варто нагадати, що абсолютні значення сил опору не враховуються в цьому коефіцієнті, тільки безпосередня зміна форми, тому явища притягнення частинок МАП до феромагнітної деталі та як наслідок вищі сили опору не враховуються. Отримані результати показані в табл. 5.3 можна вважати фактичним коефіцієнтом форми деталі при дослідженні питомого тиску. Тобто було визначено прямий параметр, що характеризує відмінності в обробленні деталей різної форми. Варто зазначити, що результати цих розрахунків залишалися стабільними при зміні значення магнітної індукції, типу та зернистості МАП [78].

Таблиця 5.3 Коефіцієнт форми деталі для визначення питомого опору при МАО [78]

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

Данні було співставлено з коефіцієнтами аеродинамічного опору [75] для таких самих форм, встановлено, що обидві групи коефіцієнтів мають певну схожість. Так найменший коефіцієнт обтічності мають циліндричні деталі (близько 0,4) деталі, що розташовувалися ребром до потоку порошку мають коефіцієнт (0,6-0,8) а найбільший – деталі квадратної форми (1 – 1,2). 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 [78]. Тому хоч коефіцієнти маюць достатню схожість у значеннях, не мають спільного походження та природи та повинні розглядатися окремо.

Також питомий тиск відносно площі оброблюваної поверхні, що зазнає безпосереднього тиску з боку МАІ може вказувати на процеси тертя поверхонь деталей з частинками порошку, що має місце при МАО. Щонайменше більша площа безпосередньо оброблюваної поверхні зумовлює більшу взаємодію тертям між МАІ та поверхнею деталі. Показаний вище коефіцієнт форми дозволяє співставляти та прогнозувати цю взаємодію. Тобто, оцінка розміру та положення поверхонь, що зазнають оброблення (при інших рівних умовах) дозволяє прогнозувати величини сил тертя, що діють в процесі МАО, та імовірний характер видалення матеріалу деталі (для визначення цього необхідно провести окремі дослідження) [78].

Фактично, питома сила тертя залежить від площі, що зазнає тертя, сили опору, та кута цієї площі до вектору накладеної сили (кута тертя). На рис. 5.8 схематично показано вектори питомої сили опору, що накладена на оброблювану поверхню деталей різної форми. З огляду на положення оброблюваних поверхонь можна припустити, що форма деталі також має вплив на величину сил тертя. Так, 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 [78]. Тобто для квадратної і трикутної деталі, що розташовувалися гранню у напрямку руху поверхня практично не зазнає впливу тангенційної складової тертя, складова більша для деталей, що розташовані ребром. Для циліндричної деталі тангенційна складова змінюється в різних точках поверхні, оскільки кут вектору питомої сили опору змінюється в межах $0 - 90^\circ$ (рис. 5.8). Проте цю думку необхідно підтвердити за допомогою практичних досліджень інтенсивності видалення матеріалу при МАО [78].

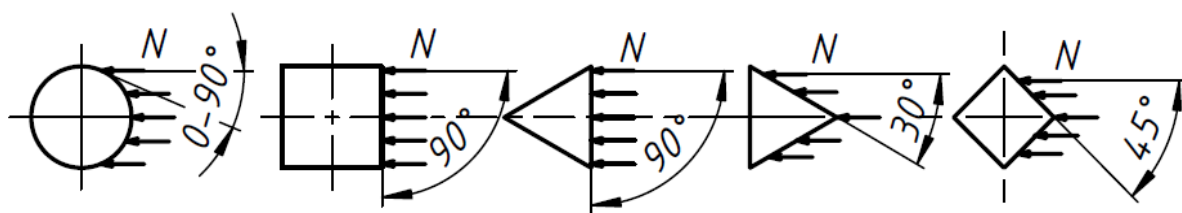


Рис. 5.8. Положення оброблюваних площин деталей відносно вектора сили опору [78]

На відміну від сили опору – сила питомого опору суттєво залежить від зміни форми деталі через зміну розмірів та положення поверхонь, що безпосередньо сприймають тиск з боку МАІ. Цю зміну питомого пору можна охарактеризувати коефіцієнтом форми деталі для питомого опору.

5.3 Вплив розміру деталей на ефективність МАО в умовах кільцевої ванни.

Для підтвердження впливу розміру деталі та сили опору зі сторони МАІ, особливості структурування МАІ в робочих зазорах – (мертва зона, конусоподібні стовпчики, веретеноподібні утворення) на характер видалення матеріалу з оброблюваної деталі було вирішено провести додаткове модельне дослідження з урахуванням розміру деталей. Для цього використано зразки з феромагнітної сталі 40Х у формі квадратних пластин різного розміру товщиною 5 мм. Пластини розташовувалися ребром до напрямку руху (рис. 5.9), розміри сторони квадрата становили: 8, 12 та 20 мм. Суть експерименту полягала у вимірюванні радіусів заокруглення бокових кромek деталей через певні проміжки часу. Для вимірювання використовували профілометр та методику визначення радіусів заокруглення викладену в розділі 2. Швидкість руху деталей у робочій зоні становила 2,5 м/с, магнітна індукція – 0,25 Тл. Для формування МАІ було використано порошок Поліам-М з зернистістю 400/315 мкм.

Більший ступінь закругленості кромки характеризує більший ступінь видалення матеріалу, та як наслідок більші сили опору при різанні матеріалу. Згідно з припущенням попередніх розділів оброблювані деталі взаємодіють з різними формоутвореннями порошку різними шляхами. Деталі малих розмірів взаємодіють з веретеноподібними формоутвореннями, натомість деталі великих

розмірів прямо взаємодіють з конусоподібними утвореннями та «мертвою» зоною на краях робочої зони (особливо це стосується феромагнітних деталей через їх властивість додатково ущільнювати «мертві» зони). На рис. 5.9 показано схематичний вигляд експериментальних зразків у робочій зоні, де 1 – положення фронтальної кромки деталі, 2 – положення бокових кромки деталі, 3 – «мертві» зони, 4 – конусоподібні утворення, 5 – веретеноподібні утворення ліворуч велика деталь (20 мм), праворуч – мала (8 мм).

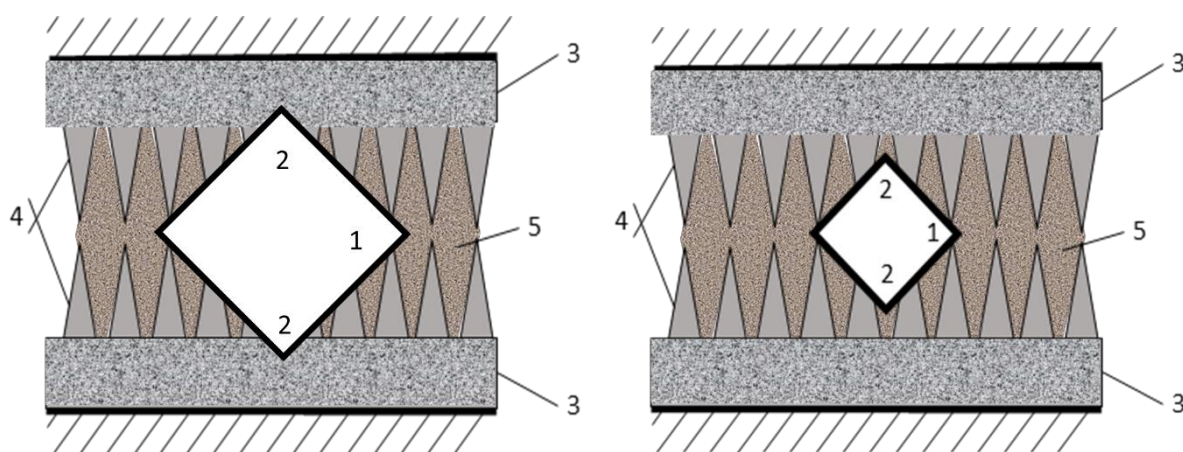


Рис. 5.9. Схема положення експериментальних зразків відносно основних формоутворень МАІ у робочій зоні

На рис. 5.10 показано гістограми залежності радіусів округлення бокових кромки (що знаходяться біля «мертвих» зон та полюсних наконечників) від часу оброблення та діагонального розміру деталі. Дані відображають середнє значення від двох кромки. Визначено, що збільшення розмірів деталі та наближення оброблюваних кромки до полюсних наконечників зумовлює збільшення радіусу заокруглення кромки (на 20 – 30%) в наслідок інтенсифікації процесів різання та видалення матеріалу. Це підтверджує наведенні вище пояснення явища ущільнення МАІ при обробленні відносно великих феромагнітних деталей (рис. ущільнення порошку). Тобто, магнітні властивості сталевих деталей у близькості до полюсних наконечників зумовлюють значне перенесення мас порошку до зони між деталлю та наконечниками, що сприяє ущільненню МАІ а також розширенню «мертвої» зони МАІ. Великі ущільнені маси порошку біля бокових кромки спричиняють

інтенсифікацію процесів різання та, як наслідок, високу ступінь заокруглення кромки.

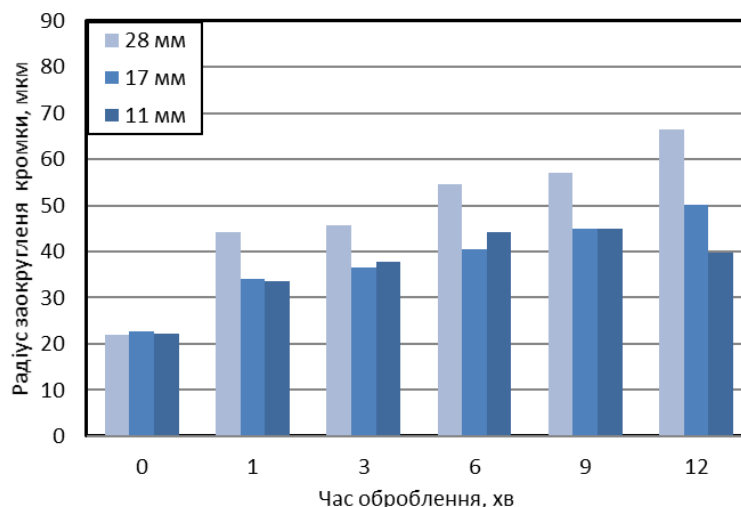


Рис. 5.10. Залежність радіусів округлення бокових кромки від часу оброблення та діагонального розміру деталі

Натомість феромагнітні деталі меншого розміру, що практично не взаємодіють з «мертвими» зонами, не збільшують ступень їх ущільнення, внаслідок чого процеси різання менш інтенсивні (рис 5.10).

Окремо варто виділити характер оброблення деталей в середині робочої зони. Для дослідження цього, було розглянуто величину радіусів заокруглення фронтальних кромки оброблюваних деталей (що розташовуються на зустріч «потoku МАІ»). Результати показані на рис. 5.11. Визначено, що найбільші радіуса заокруглень мають фронтальні кромки малих деталей. Це пояснюється тим, що при МАО таких деталей створюються умови, при яких відбувається руйнування – «розриву» веретеноподібних формувань в МАІ частини яких зісковзують і, як наслідок, відбувається процес заокруглення фронтальних кромки, що розташовані в середині робочої зони. Натомість оброблення деталей відносно великих розмірів спричиняє «утримання» деформованих веретеноподібних формувань на бокових поверхнях зразків в квазістаціонарному стані з подальшим транспортуванням груп частинок МАП у напрямку до «мертвої» зони та зменшення об'ємів порошку в середній частині

робочої зони, що зменшує інтенсивність процесів видалення матеріалу з фронтальної кромки деталі.

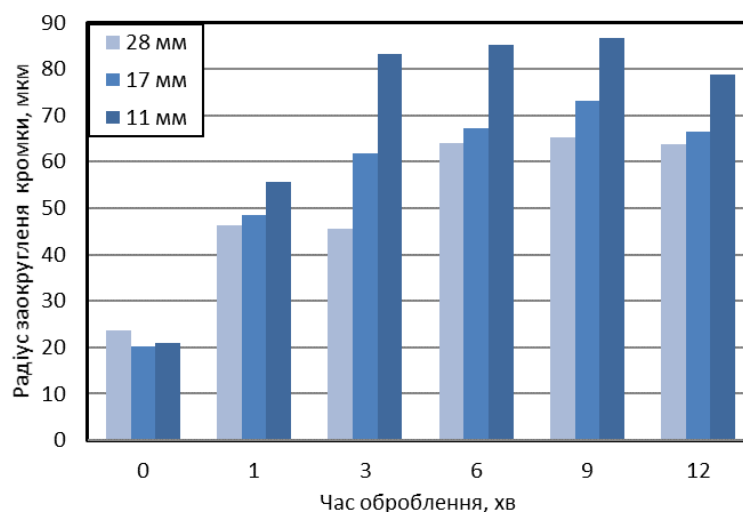


Рис. 5.11. Залежність радіусів округлення фронтальних кромки від часу оброблення та діагонального розміру деталі

Тобто при обробленні феромагнітних деталей великих розмірів формоутворення в МАІ переміщуються до «мертвих» зон збільшуючи в них щільність та інтенсифікуючи оброблення бокових елементів деталей, які розташовані поблизу поверхонь полюсних наконечників в зонах з підвищеною щільністю МАІ. Натомість оброблення деталей малих розмірів характеризується накопиченням формоутворень МАІ в зоні перед деталлю, що спричиняє інтенсифікацію оброблення фронтальної кромки.

Підвищена ефективність оброблення в «мертвих» зонах також частково розглядалася у роботах [2, 3, 27, 55, 60, 61] де додатковий рух оброблюваної лопатки ГТД в зони ущільненого МАІ використовувався для підвищення ефективності видалення матеріалу з оброблюваної поверхні. Дане дослідження підтверджує це та показує пряму залежність між інтенсивністю оброблення поверхонь та їх близькістю до «мертвої» зони МАІ. Використання цієї інформації при розробці технології оброблення дозволить покращити ефективність процесу МАО шляхом суттєвого пришвидшення процесу оброблення. Це можна застосовувати наприклад при оброблення лопаток зі здійсненням ними коливальних рухів навколо власної осі, а також при

обробленні деталей з твердих сплавів (наприклад змінних багатограних непереточуваних пластин для PI) з габаритним розміром, близьким до ширини робочої зони. Тобто такі технології можуть застосовуватися для оброблення широкої номенклатури деталей при використанні додаткових методів, що дозволяють переміщати деталь у зони МАІ, що забезпечують ефективну обробку [2, 3, 27, 55, 60, 61].

5.4 Висновки

Встановлено, що форма деталей (для даних умов експерименту) не має безпосереднього впливу на силу опору (різниця на більше 15%), проте дослідження питомого опору показало, що співвідношення питомого опору деталей різної форми можна представити у вигляді коефіцієнту, що подібний коефіцієнтами опору в аеродинаміці, проте зумовлений іншими процесами та явищами.

Встановлено явище розширення мертвої зони МАП на полюсних наконечниках при обробленні феромагнітних деталей великого розміру (розмір деталі 16 мм при ширині робочої зони 35 мм), що залежить від безпосередньої близькості поверхонь феромагнітної деталі до полюсних наконечників. Це явище суттєво підвищує силу опору від 20 до 70%.

Запропоновано схему взаємодії МАІ з феро- та парамагнітними деталями, що враховує напрямок переміщення МАП в робочій зоні зумовлений силами магнітного притягнення.

Збільшення розмірів деталей з титану всіх досліджуваних форм непропорційно впливає на зростання сили опору (збільшення розміру в 2 рази спричиняє збільшення сили опору в 1,5 рази), що може бути зумовлено взаємодією деталей з різними квазістабільними формоутвореннями МАІ.

Визначено, що наближення оброблюваних поверхонь феромагнітних деталей до мертвих зон не тільки підвищує величину сили опору на 20 – 70 %, але й інтенсифікує процес різання на 20 – 30%. З огляду на це було запропоновано враховувати наявність ущільнених зон МАІ при розробці технологічних процесів MAO.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. За результатами аналізу наявної інформації про особливості формування МАІ в процесі МАО визначено фактори, реологічні властивості, явища та процеси, що відбуваються при формуванні МАІ і сил, що виникають при обробленні та впливають на технологічні особливості оброблення реальних деталей. Виявлено обмежений характер науково-технічної інформації щодо методик визначення сил, та принципових відмінностей в обробленні виробів з різними магнітними властивостям в умовах оброблення з різними за величиною магнітними зазорами.

2. Для безпосереднього встановлення сил, які діють в умовах великих робочих зазорів з боку МАІ при МАО було використано методики вимірювання крутного моменту на валу двигуна, що обертає деталь, та безпосереднє визначення сили опору за допомогою тензометричного консольного вимірювального елемента. Розроблено відповідне обладнання, що дозволило виконувати дослідження з врахуванням технологічних факторів, форми, розмірів і матеріалу оброблюваних деталей. Обрано порошки для формування МАІ з огляду на їх магнітні характеристики та характер оброблення деталей.

3. За результатами досліджень тангенційної складової сил, що виникають при взаємодії оброблюваної поверхні деталі та МАІ встановлено, що ефективний момент тертя при обробленні феромагнітної деталі (при даних зразках та технологічних умовах) не перевищує 1,4 Нм, при обробленні немагнітних деталей – 0,9 Нм. Показано, що ефективний момент тертя прямо залежить від величини магнітної індукції, швидкостей руху деталі в робочій зоні та навколо своєї осі. Отримані функціональні залежності між силами взаємодії між деталлю і МАІ залежно від зазначених технологічних параметрів, дозволили визначити коефіцієнти тертя в парі поверхня деталі – МАІ, які необхідні для оцінювання абразивної здатності ферабразивного середовища. Встановлено області МАО при яких відбувається: формування квазістабільного МАІ (при швидкості обертання навколо власної осі 0 – 10 рад/с), область формування стабільного МАІ (10 – 65 рад/с) та область з аномальним

зростанням/спаданням сил тертя (більше 65 рад/с). Визначено процеси, пов'язані з особливостями поведінки часток МАІ при контакті з оброблюваними деталями в процесі МАО, та виникненням зон заклинювання між деталлю та полюсними наконечниками верстата. Показано, відмінності в характері взаємодії між МАП та деталями з різними магнітними властивостями. Використання порошків з округлою формою спричиняє переважно пластичне деформування поверхневого шару оброблюваної поверхні. Найбільший вплив на зміну сил фрикційного походження має збільшення розміру частинок МАП.

4. Вперше виконано дослідження нормальної складової сил взаємодії деталі та МАІ в умовах великих магнітних зазорів. Визначено, що сила опору при обробленні циліндричних деталей має лінійну залежність від величини магнітної індукції та становить 720 Н/Тл для порошку з зернистістю 200/100 мкм та 960 Н/Тл для 400/315 мкм. Показано, що сила опору при обробленні немагнітних матеріалів Д16Т, ВТ8, БрОц не має суттєвих відмінностей. Встановлено, що сили лобового опору при МАО феромагнітних зразків, як і для немагнітних зразків не залежать від швидкості оброблення і змінюються в діапазоні від 160 до 220 Н, це в 1,2-1,5 разів вище, ніж для немагнітних деталей (80 – 180 Н). Визначено причини відмінності в величинах сили опору при обробленні магнітних та немагнітних деталей, які пов'язані з особливостями взаємодії структурних елементів МАІ з оброблюваними поверхнями та формуванням зон заклинювання порошку. Показано, що зростання зернистості порошку з 200/100 до 400/315 мкм спричиняє зростання сили опору в 1,2 – 1,3 рази.

5. Показано вплив розміру та форми деталі на характер силової взаємодії між деталлю та МАІ. Визначено, що при збільшенні діаметру парамагнітної деталі в 2 рази відбувається збільшення сили опору в 1,5 рази, що пояснюється відмінностями характеру оброблення різними структурними елементами МАІ. Натомість, оброблення феромагнітних деталей характеризується пропорційним приростом сили опору від зростання розміру деталей. Показано, що за властивостями і характером його поведінки

фероабразивне середовище, з якого формується МАІ, можна віднести до класу бінгамівських через характер впливу швидкості на оброблення при малих значеннях магнітної індукції (0,2 – 0,22 Тл). 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 %. Показано, що зміна форми деталей (при фіксованому поперечному перерізі) не має значного впливу на величину сили опору. Проте, значення питомого опору за відношенням до поверхні, що контактує з «поток» МАІ змінюється. Співвідношення питомого опору між формами деталей може бути описане коефіцієнтом форми деталі. Визначено, що при обробленні феромагнітних деталей великого розміру (16 мм) присутнє явище розширення мертвої зони МАІ на полюсних наконечниках, що суттєво (від 20 до 70 %) підвищує силу опору за рахунок підвищення жорсткості феромагнітного середовища, ефективного перемішування його елементів. Явище зумовлене магнітною взаємодією між деталлю та МАІ при безпосередній близькості полюсних наконечників до поверхонь деталі, що забезпечує ефективне диспергування матеріалу з оброблюваних поверхонь. Запропоновано схему взаємодії МАІ з феро- та парамагнітними деталями, що враховує напрямок переміщення МАІ в робочій зоні, зумовлений силами магнітного походження. Встановлено, що при обробленні немагнітних деталей проявляється явище псевдозрідження фероабразивного середовища і отримання більш рівномірного оброблення складнопрофільних виробів. Показано, що при обробленні тонких деталей типу лопатки ГТД на великих швидкостях оброблення 3 – 3,5 м/с виникає явище розриву веретеноподібних утворень в МАІ, що супроводжується різким (до 25%) зниженням сили опору (це явище є характерним тільки для відносно тонких деталей, тонких кромок за умов використання відносно крупного порошку). Встановлене явище не суперечить результатам попередніх досліджень стосовно зриву маси порошку з торця лопатки, що прямо впливає на характер оброблення і процесів, які відбуваються при формуванні різальних

кромки кінцевого різального інструменту, багатограничних твердосплавних непереточуваних пластин, тощо. Розглянуто явище періодичних коливань сили опору та вплив технологічних параметрів на величину цих коливань. Визначено, що періодичні коливання залежать від швидкості оброблення, і при збільшенні швидкості оброблення з 1 до 3,5 м/с відбувається зменшення амплітуди коливань з 40% до 15% відносно середнього значення сили опору.

6. Визначено, що наближення оброблюваних поверхонь феромагнітних деталей не тільки підвищує величину сили опору на 20 – 70 %, але й інтенсифікує процес різання на 20 – 30%. Це відбувається через взаємодію оброблюваних поверхонь деталі з ущільненими формуваннями МАІ (такі як «мертва» зона та конусоподібні формоутворення). З огляду на це доцільним є врахування наявності ущільнених зон в МАІ при розробці технологічних процесів МАО.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Майборода В.С. Магнитно-абразивная обработка специальных деталей: дис. ...канд. техн. наук: 05.02.08 / Майборода Виктор Станиславович. – Киев, 1988. – 170 с.
2. Майборода В.С. Основи створення і використання порошкового магнітно-абразивного інструменту для фінішної обробки фасонних поверхонь : дис. докт. техн. наук: 05.03.01 / Майборода В. С. – Київ, 2001. – 404
3. Майборода, В. С. Магнитно-абразивная обработка деталей сложной формы [Электронный ресурс]: монография / В. С. Майборода, И. В. Слободянюк, Д. Ю. Джулий ; М-во образования и науки Украины, Нац. техн. ун-т Украины “Киев. политехн. ин-т им. И. Сикорского”. – Электронные текстовые данные (1 файл: 10,75 Мбайт). – Житомир : Рута, 2017. – 272 с.
<http://ela.kpi.ua/handle/123456789/27484>
4. Барон Ю.М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов. Л.: Машиностроение. Ленингр. Отд-ние, 1986. – 176 с.
5. Акулович Л. М. Технология и оборудование магнитно-абразивной обработки металлических поверхностей различного профиля/ Л.М. Акулович, Л.Е. Сергеев. – Минск : БГАТУ, 2013. – 372 с.
6. Акулович Л. М. Основы магнитно-абразивной обработки металлических поверхностей / Л. М. Акулович, Л. Е. Сергеев, В. Я. Лебедев. – Минск: БГАТУ, 2012. – 316 с.
7. Гейчук В.М. Відновлення властивостей магнітно-абразивного інструменту динамічними силами при обробці в кільцевій ванні в умовах великих робочих зазорів / В.М. Гейчук, В.С.Майборода, І.В. Ткачук // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету ім. М.Остроградського. – Кременчук: КДПУ, 2012. – № 2 (73), Ч.1. – С. 146 – 155.
8. Qian, C., Fan, Z., Tian, Y. et al. A review on magnetic abrasive finishing. Int J Adv Manuf Technol 112, 619–634 (2021). <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06363-x>

9. Hashimoto F., Yamaguchi H. Abrasive fine-finishing technology. CIRP Annals - Manufacturing Technology. 2016. Vol. 65, P. 597-620.
10. Jain R.K., Jain V.K. Abrasive fine finishing processes - a review. Journal for Manufacturing Science and Production. 1999. Vol. 2. P. 55–68.
11. Vahdati, M.; Rasouli, S.A.: Evaluation of Parameters Affecting Magnetic Abrasive Finishing on Concave Freeform Surface of Al Alloy via RSM Method, in Advances in Materials Science and Engineering, 2016
12. H. Yamaguchi Magnetic-abrasive finishing of cutting tools for high-speed machining of titanium alloys / H. Yamaguchi, A. Srivastava, M. Tan, F. Hashimoto. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. 2014. Vol. 7, P. 299–304.
13. Mori T.; Hirota K.; Kawashima Y. Clarification of magnetic abrasive finishing mechanism. Journal of Materials Processing Technology. 2003. Vol. 143. P. 682–686.
14. Shinmura T., Takazawa K., Hatano E. Study on magnetic abrasive process: application to edge finishing. Journal of the Japan Society for Precision Engineering. 1985. Vol. 19(3), P. 218–220.
15. Shinmura, T., Takazawa, K., Hatano, E., Matsunaga, M., & Matsuo, T. (1990). Study on Magnetic Abrasive Finishing. CIRP Annals, 39(1), 325–328. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61064-6](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61064-6)
16. Singh D.K., Jayswal S.C., Jain, V.K. Magnetic abrasive finishing (MAF). Micromanufacturing processes. 2013. Vol. 8, P. 155-182.
17. Study on magnetic abrasive process: process principle and finishing possibility. / T. Shinmura, K. Takazawa, E. Hatano, T. Aizawa. Journal of the Japan Society for Precision Engineering. 1985. Vol. 19(1), P. 54–55.
18. Vahdati M. Rasouli S. A. Study of magnetic abrasive finishing on freeform surface. Transactions of the Institute of metal finishing. 2016. Vol. 94, P. 294-302.
19. Shinmura, T.; Takazawa, K.; Hatano, E.; Matsunaga, M.: Study on Magnetic Abrasive Finishing, in CIRP Annals - Manufacturing Technology 39/1, S. 325-328, 1990

20. Матюха П. Г., Бурдин А.В. Современные тенденции развития магнитно-абразивной обработки. Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. 2009. №6. С. 166-173.
21. Івановський О. А. Формування МАІ для оброблення свердел в умовах великих магнітних щілин дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / Івановський Олексій Анатолійович. – Київ, 2009.
22. Сакулевич Ф.Ю. Основы магнитно-абразивной обработки/ Ф.Ю. Сакулевич – Мн.: Наука и техника, 1981. – 328 с.
23. Gurpreet Singh, Harish Kumar, Harmesh Kumar Kansal, Anil Srivastava, Effects of Chemically assisted Magnetic Abrasive Finishing Process Parameters on Material Removal of Inconel 625 tubes, Procedia Manufacturing, Volume 48, 2020, Pages 466-473, ISSN 2351-9789, <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.05.070>.
24. Dolinsky, Elperin. Ponderomotive Forces in Liquid Conductors with Macroscopic Solid Inclusions. AIP Publishing, 1994, doi:10.1063/1.357341.
25. Оликер В.Е. порошки для магнитно-абразивной обработки и износостойких покрытий. М.: Металлургия, 1990. 176 с.
26. Майборода В.С. Дослідження властивостей магнітно-абразивного інструменту сформованого з сумішшю порошків / В.С. Майборода // Процеси механічної обробки в машинобудуванні. Збірник наук. праць ЖДТУ. – Житомир: ЖДТУ, 2009. – Вип.6. – С. 144 – 159.
27. Степанов О. В. Исследование процесса формирования магнитно-абразивного порошкового инструмента для обработки деталей сложной геометрической формы: дис. ... канд. техн. наук : 05.16.06 / Степанов Олег Васильевич. – Киев, 1997. – 145 с.
28. Шлюко В.Я. Закономерности формирования ферроабразивного порошка в магнитно-абразивный инструмент в условиях кольцевого расположения магнитных зазоров / В.Я. Шлюко, В.С. Майборода, О.В. Степанов // Порошковая металлургия. – 1989. – №5. – С. 72 – 77.

29. Крымский М.Д. Формирование порошкового магнитно-абразивного инструмента. 1. Восстановимость формы // Порошковая металлургия. – 1987. – № 9. – С. 8–12.
30. Крымский М.Д. Формирование порошкового магнитно-абразивного инструмента. II. Условия заклинивания // Порошковая металлургия. – 1987. – № 10. – С. 23–28.
31. Гнесин Г.Г. Принципы создания магнитно-абразивных материалов / Г.Г. Гнесин, М.Д. Крымский, Л.Н. Тульчинский // Магнитно-абразивные материалы и методы их испытания. – Киев: ИПМ АНУССР, 1980. – С. 17 – 25.
32. Крымский М.Д. Влияние формы магнитно-абразивных зерен на их режущую способность / М.Д. Крымский. // Порошковая металлургия. – 1983. – №6. – С. 83 – 85.
33. Крымский М.Д. Распределение и уплотнение магнитно-абразивного порошка в рабочем зазоре станка / М.Д. Крымский // Магнитно-абразивные материалы и методы их испытания. – Киев: ИПМ АНУССР, 1980. – С. 92 – 97.
34. Крымский М.Д. Методика оценки абразивной способности порошковых магнитно-абразивных материалов / М.Д. Крымский // Магнитно-абразивные материалы и методы их испытания. – Киев: ИПМ АНУССР, 1980. – С. 84 – 92.
35. Yuewu Gao, Yugang Zhao, Guixiang Zhang, Fengshi Yin, Haiyun Zhang, Modeling of material removal in magnetic abrasive finishing process with spherical magnetic abrasive powder, International Journal of Mechanical Sciences, Volume 177, 2020, 105601, ISSN 0020-7403, <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105601>
36. Ткачук І. В. Формування магнітно-абразивного інструменту зі стабільними властивостями в робочих зазорах кільцевого типу : дис. канд. техн. наук : 05.03.01 / Ткачук І. В. – Київ, 2015. – 164 с.
37. Ткачук І.В., Майборода В.С. Геометричні характеристики магнітно-абразивних порошків. Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. 2014. № 34. С. 49–55.

38. Lin, C.T., Yang, L.D. & Chow, H.M. Study of magnetic abrasive finishing in free-form surface operations using the Taguchi method. *Int J Adv Manuf Technol* 34, 122–130 (2007). <https://doi.org/10.1007/s00170-006-0573-8>
39. Майборода В.С. Структурно-фізична модель формування магнітно-абразивного інструменту в великих робочих зазорах кільцевого типу при обробці стрижневих виробів / В.С. Майборода, І.В. Ткачук, Д.Ю. Джулій // Наукові праці ДонНТУ. Серія: Машинобудування і машинознавство Випуск 1 (10) 2013
40. V.K Jain, Prashant Kumar, P.K Behera, S.C Jayswal, Effect of working gap and circumferential speed on the performance of magnetic abrasive finishing process, *Wear*, Volume 250, Issues 1–12, 2001, Pages 384-390, ISSN 0043-1648, [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(01\)00642-1](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(01)00642-1)
41. Тарган Д.В., Майборода В.С., Джулій Д.Ю. Аналіз інтенсивності магнітно-абразивного оброблення мітчиків в залежності від кінематичних параметрів процесу. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. Сучасні технології в машинобудуванні, транспорті та гірництві*. 2017. №106. С. 82-88. URL: http://visnikkrnu.kdu.edu.ua/statti/2017_5_82-88_5-2017.pdf
42. Biermann D. Magnetfinishen zur Präparation von VHM-Werkzeugen / D. Biermann, M. Wolf, T. Heymann // *Wissenschaft und Forschung*. – 2013. – 5 (2). – P. 24 – 29.
43. Гейчук В. М. Синтез кінематики процесу магнітно-абразивної обробки в кільцевій ванні : дис. ... д-ра техн. наук. : 05.03.01 – процеси механічної обробки, верстати та інструменти / В. М. Гейчук. - К., 2012. – 472
44. Тарган Д.В. Вплив кінематики процесу магнітно-абразивного оброблення на параметри якості робочих поверхонь мітчиків із швидкорізальної сталі / Д.В. Тарган, В.С. Майборода, О.А. Плівак, Г.Г. Добровольський. *Вісник ЖДТУ. Серія: Технічні науки*. 2018. №81. С. 48-53.
45. Zelinko A. Magnetabrasives Polieren auf Bearbeitungszentren Dr.-Ing. – Dortmund, Germany, 2022. – 167 p.

46. D.K. Singh, V.K. Jain, V. Raghuram, Experimental investigations into forces acting during a magnetic abrasive finishing process. *Int J Adv Manuf Technol* 30, 652–662 (2006).
47. Shukla, V.C.; Pandey, P.M.; Dixit, U.S.; Roy, A.; Silberschmidt, V.: Modeling of normal force and finishing torque considering shearing and ploughing effects in ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing process with sintered magnetic abrasive powder, in *Wear* 390-391, S. 11-22, 2017
48. Verma, G.C.; Kala, P.; Pandey, P.M.: Experimental investigations into internal magnetic abrasive finishing of pipes, in *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 88, S. 1657-1668, 2017
49. Prateek Kala, Pulak M. Pandey. Experimental Study on Finishing Forces in Double Disk Magnetic Abrasive Finishing Process While Finishing Paramagnetic Workpiece, *Procedia Materials Science*, Volume 5, 2014, Pages 1677-1684, ISSN 2211-8128, <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.356>.
50. T.C. Kanish, S. Narayanan, P. Kuppan, S. Denis Ashok. Investigations on the Finishing Forces in Magnetic Field Assisted Abrasive Finishing of SS316L, *Procedia Engineering*, Volume 174, 2017, Pages 611-620, ISSN 1877-7058, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.196>.
51. Misra A, Pandey PM, Dixit US, Roy A, Silberschmidt VV. Modeling of finishing force and torque in ultrasonic-assisted magnetic abrasive finishing process. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2019;233(2):411-425. doi:10.1177/0954405417737579
52. Тарган Д. В. Підвищення якості мітчиків із швидкорізальної сталі магнітно-абразивним методом: дис. ... док. філософії / Тарган Дмитро Валентинович. – Київ, 2021. – 165 с.
53. Byelyaev O. Erhöhung der Leistungsfähigkeit von HSS-Spiralbohrern durch Einsatz der magnetabrasiven Bearbeitung. Dissertation Dr.-Ing. – Magdeburg, Germany, 2008. – 149 p.
54. Пат. DE 102009015158 A1 ФРН, МПК B24 B31/112 (2006.01) Werkzeugmaschine zur magnetabrasiven Bearbeitung / Geichuk Volodymyr,

Maiboroda Victor, Byelyayev Oleksiy; заявник та патентовласник ZOM Oberflächenbearbeitung GmbH. – № DE200910015158; заявл. 26.03.2009; опубл. 30.09.2010.

55. Пат. 25441 А Україна, МПК В24 В31/112 (2006.01). Спосіб магнітно-абразивної об'ємної обробки / Майборода В.С., Гейчук В.М., Степанов О.В.; заявник та патентовласник Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». – № 95094329; заявл. 29.09.95; опубл. 30.10.98; бюл. № 6.

56. Пат. 84464 С2 Україна, МПК В24 В31/112 (2006.01). Магнітна система для об'ємної обробки феромагнітними порошками / Гейчук В.М., Майборода В.С.; заявник та патентовласник Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». – № а200611768; заявл. 08.11.2006; опубл. 27.10.2008; бюл. № 20.

57. Ткачук, И. В.; Майборода, В. С.; Джулий, Д. Ю. Особенности формирования магнитно-абразивного инструмента при магнитно-абразивной обработке в условиях больших рабочих зазоров кольцевого типа. Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, 2014, 2: 132-137

58. Джулій Д.Ю. Формування магнітно-абразивного інструменту при магнітно-абразивному обробленні довгомірних деталей у кільцевій робочій зоні [Текст]/ Д.Ю. Джулій, В.С. Майборода, І.В. Ткачук, В.М. Гейчук // Процеси механічної обробки в машинобудуванні випуск 11 (2011). 92 – 106.

59. Майборода В.С. Формування магнітно-абразивного інструменту в кільцевих щілинах з різною формою поперечних перерізів робочих зон при магнітно-абразивній обробці кінцевих та осьових інструментів / В.С. Майборода, В.М. Гейчук, О.А. Івановський // Вестник НТУУ «КПІ». Машиностроение. – Киев, 2006. – Вып. 49. – С. 153 – 164.

60. Пат. 16512 України В24 В31/112 (2006.01) МПК Спосіб магнітно-абразивного об'ємного полірування/ Верменко В. Я., Степанов О. В., Шлюко В. Я., Шпатаковський О. Ф., Крамаровський Б. І., Андронов О. В., Майборода В.

С.; заявник та патентовласник Київський політехнічний інститут. ; опубл. 29.08.97.

61. Пат. 18814 України В24 В31/112 (2006.01) МПК Спосіб магнітно-абразивної обробки/ Майборода В.С., Степанов О.В., Андронов А.В., Верменко В.Я., Давидов С.П., Устенко В.Г., Шлюко В.Я.; заявник та патентовласник Київський політехнічний інститут. № 4955047; заявл. 07.06.1991; опубл. 25.12.97; бюл. № 6/1997.

62. Jayswal, S., Jain, V. & Dixit, P. Modeling and simulation of magnetic abrasive finishing process. Int J Adv Manuf Technol 26, 477–490 (2005). <https://doi.org/10.1007/s00170-004-2180-x>

63. Yamaguchi H., Shinmura T. Study of an internal magnetic abrasive finishing using a pole rotation system. Precision Engineering. 2000. Vol. 24, no. 3. P. 237–244. URL: [https://doi.org/10.1016/s0141-6359\(00\)00037-4](https://doi.org/10.1016/s0141-6359(00)00037-4)

64. Джулій Д. Ю. Підвищення якості багатограних непереточуваних твердосплавних пластин при магнітно-абразивному обробленні в кільцевій ванні: дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / Джулій Дмитро Юрійович. – Київ, 2014. – 175 с.

65. В.С. Майборода Магнітно-абразивна обробка осьового і кінцевого різального інструменту. Дослідження впливу умов базування деталей на зміну геометричних характеристик різальних кромek свердел при магнітно абразивній обробці / В.С. Майборода, Д.В. Хроновский, В.І. Солодкий, Н.В. Ульяненко. Наукові вісті НТУУ "КПІ". 2002. №5. С. 69-73.

66. Майборода В.С. Кінетика процесу магнітно-абразивної обробки твердосплавних непереточуваних пластин в умовах кільцевої робочої зони/ В.С. Майборода, Т.М. Капушак // Вісник ЖДТУ. – Житомир: ЖДТУ, 2004. – №4(31). Т1. – С. 57 – 65.

67. Майданюк С.В., Плівак О.А., Бекмурадов Р.А. Модуль для вимірювання фасонних профілів/ Вісник ЖДТУ. – 2007. - № 2 (41). – С. 15 – 18.

68. Солодкий В. І., Вовк В. В., Плівак О.А., Яцук С. О. Проблеми механічної обробки [Електронний ресурс]. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 202 с.

69. Майборода В. С. Магнітно-абразивне оброблення кінцевого різального інструменту в умовах великих магнітних щілин із використанням відновлювальних елементів / В. Майборода, Д. Джулій, І. Ткачук, О. Беляєв // Вісник ТНТУ. — 2012. — Том 68. — № 4. — С.133-141. — (машинобудування, автоматизація виробництва та процеси механічної обробки).
70. Пат. 104328 Україна В24 В31/112 (2006.01) МПК. Спосіб магнітно-абразивного оброблення / Майборода В.С., Гейчук В.М., Джулій Д.Ю., Ткачук І.В.; заявник та патентовласник Київський політехнічний інститут. №101a201201745; заявл. 16.02.2012; опубл. 27.01.2014; бюл. № 2/2014.
71. Жук Р.Б., Майборода В.С., Заставський К. О. (2021). Особливості взаємодії магнітно-абразивного інструменту з оброблюваною поверхнею в умовах кільцевої ванни. Технічна інженерія. 3-13. 10.26642/ten-2021-2(88)-3-13.
72. Майборода В. С. Дослідження сил лобового опору, що виникають в магнітно-абразивному інструменті при обробленні циліндричних деталей в кільцевій ванні/ Майборода В. С., Джулій Д. Ю., Бесарабець Ю. Й., Слободянюк І. В., Заставський К. О./ № 2 (2022): Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні [https://doi.org/10.20998/2079-004X.2022.2\(6\).03](https://doi.org/10.20998/2079-004X.2022.2(6).03)
73. Maiboroda, V., Dzhulii, D., & Zastavskyi, K. (2023). Analysis of the forces acting from the side of the magneto-abrasive tool on parts being machined during magneto-abrasive machining in conditions of the annular bath with large working gaps. Mechanics and Advanced Technologies, 7(1), 61–67. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2023.7.1.271548>
74. Batchelor, G.K. (1967). An Introduction to Fluid Dynamics. Cambridge University Press. ISBN 0-521-66396-2.
75. Gudmundsson Snorri. 2014. General Aviation Aircraft Design : Applied Methods and Procedures. First ed. Oxford UK: Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/C2011-0-06824-2>
76. Заставський, К., & Майборода, В. (2022). Вплив розміру деталей на сили лобового опору при магнітно-абразивному обробленні . Mechanics and

Advanced Technologies, 6(2), 168–177. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2022.6.2.264410>

77. Крих Г. Б. Особливості застосування реологічних моделей неньютонівських рідин. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». 2007. № 581. С. 71–82.

78. Заставський, К. О., Майборода, В. С. (2023). Вплив форми оброблюваної деталі на сили опору під час магнітно-абразивного оброблення. Технічна інженерія, (2(92)), 31–38. [https://doi.org/10.26642/ten-2023-2\(92\)-31-38](https://doi.org/10.26642/ten-2023-2(92)-31-38)

79. Майборода В. С. Дослідження сил опору з боку порошкового середовища на рух деталей при магнітно-абразивному обробленні в кільцевій ванні / В. С. Майборода, Д. Ю. Джулій, К. О. Заставський // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер. : Технології в машинобудуванні : зб. наук. пр. = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Ser. : Techniques in a machine industry : col. of sci. papers. – Харків : НТУ "ХПІ", 2023. – № 2 (8). – С. 134-139. [https://doi.org/10.20998/2079-004X.2023.2\(8\).16](https://doi.org/10.20998/2079-004X.2023.2(8).16)

80. Майборода В.С. Эффективность применения при магнитно-абразивной обработке восстанавливающих стержневых элементов / В.С. Майборода, Д.Ю. Джулий, И.В. Ткачук // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ, 2012. – Вип. 30. – С. 171 – 177.

81. Rajneesh Kumar Singh, D.K. Singh, Swati Gangwar, Advances in Magnetic Abrasive Finishing for Futuristic Requirements - A Review, Materials Today: Proceedings, Volume 5, Issue 9, Part 3, 2018, Pages 20455-20463, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.422>.

82. D.K. Singh, V.K. Jain, V. Raghuram, Parametric study of magnetic abrasive finishing process, Journal of Materials Processing Technology, Volume 149, Issues 1–3, 2004, Pages 22-29, ISSN 0924-0136, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2003.10.030>

ДОДАТОК А

Таблиця значень коефіцієнтів функції 3.1

Матеріал деталі	Тип порошку	Магнітна індукція, Тл	Розмір часток, мкм	Коефіцієнти								
				A_{00}	A_{01}	A_{02}	A_{10}	A_{11}	A_{12}	A_{20}	A_{21}	A_{22}
40X13	Полімам-М	0.2	200/100	210.5	1356.2	-34.1	-204.7	-160.6	-609.6	54.4	-43.2	227.7
			400/315	319.4	3133.1	-4095.8	-304.5	-1009.4	2090.7	73.1	120.9	-347.1
		0.24	200/100	69.7	2409.1	-1349.3	-47.4	-1381.9	1252.5	11.7	274.1	-303.5
			400/315	218.5	4929.3	-6760.1	-187.5	-2375.9	4266.0	40.8	390.7	-782.3
	Полімам-Т	0.2	200/100	78.8	1753.3	-226.9	-77.0	-1454.2	705.1	19.7	365.0	-252.1
			400/315	14.6	1033.0	49.6	-18.7	-634.2	330.2	10.5	157.9	-118.6
		0.24	200/100	9.2	1208.7	904.2	4.0	-766.5	-417.8	-1.9	171.4	32.6
			400/315	-20.5	1162.3	-96.1	31.0	-654.0	497.1	-2.6	145.8	-150.8
ВТ8	Полімам-М	0.2	200/100	61.5	1111.1	-1719.5	-64.2	-120.6	492.5	14.3	23.0	-72.4
			400/315	173.0	1052.2	-1811.0	-126.8	451.6	-199.4	26.5	-140.3	154.8
		0.24	200/100	73.5	1386.6	-2471.2	-67.4	-86.2	921.2	13.4	-20.6	-124.8
			400/315	188.2	901.8	-1637.2	-143.6	942.7	-837.7	30.1	-276.2	334.7
	Полімам-Т	0.2	200/100	78.5	1114.8	-1652.7	-51.0	-226.4	603.7	9.8	-5.1	-46.4
			400/315	70.8	1507.5	-2382.6	-26.0	-558.4	1548.0	5.4	78.7	-285.0
		0.24	200/100	101.8	1435.1	-2287.4	-86.8	-583.8	1389.5	19.9	91.0	-250.5
			400/315	103.7	1782.0	-2015.7	-64.2	-800.8	1051.5	16.9	138.2	-141.2
БрОц	Полімам-М	0.2	200/100	123.9	1322.5	-2386.3	-106.4	369.8	268.8	21.9	-181.9	95.4
			400/315	322.0	969.7	-1905.2	-271.1	984.0	-695.8	61.5	-270.9	286.7
		0.24	200/100	107.3	3126.7	-4963.4	-102.8	-1146.4	2479.2	22.3	168.2	-405.3
			400/315	188.7	2243.1	-3860.4	-118.3	-65.6	1013.4	21.5	-71.9	-42.9
	Полімам-Т	0.2	200/100	124.9	1355.3	-1965.5	-101.8	-633.8	1100.6	21.7	124.8	-201.1
			400/315	414.8	2662.3	-4507.8	-367.2	-1531.3	3350.8	87.7	294.3	-718.9
		0.24	200/100	112.0	1556.9	-2452.8	-100.5	-726.3	1502.0	23.2	130.9	-274.5
			400/315	237.2	2871.2	-3890.3	-185.8	-1617.9	2436.7	42.7	292.8	-433.0
Д16Т	Полімам-М	0.2	200/100	141.1	2019.4	-2975.3	-129.2	-669.6	1381.0	29.0	95.5	-194.6
			400/315	142.7	1275.1	-1821.6	-134.9	-222.3	584.2	30.5	32.9	-82.1
		0.24	200/100	97.8	2289.4	-3594.3	-73.5	-755.0	1848.8	13.9	103.6	-285.9
			400/315	120.6	1495.0	-2392.9	-89.6	-249.2	891.5	17.0	34.1	-133.2
	Полімам-Т	0.2	200/100	138.4	1341.3	-2200.1	-120.6	-463.5	1150.8	26.6	67.1	-181.6
			400/315	136.0	1310.3	-1863.7	-104.4	56.1	206.9	27.9	-94.2	113.5
		0.24	200/100	76.8	1601.3	-2417.1	-72.5	-700.6	1395.1	18.0	116.3	-233.6
			400/315	94.1	2171.4	-3352.8	-56.3	-739.9	1706.0	15.3	117.5	-281.3

Таблиця значень коефіцієнтів функції 3.2

Матеріал деталі	Тип порошку	Розмір часток, мкм	Коефіцієнти							
			C_{00}	C_{01}	C_{02}	C_{10}	C_{11}	C_{12}	C_{20}	C_{21}
Феромагнітний сплав 40X13	Полімам-М	200/100	1310.2	-10924.8	28566.0	-42.9	338.6	-524.7	3.5	-26.2
		400/315	2287.4	-20796.3	54488.9	-173.5	2659.4	-8138.5	-55.8	228.7
	Полімам-Т	200/100	643.6	-4668.2	13216.5	152.3	-1436.3	3243.8	-6.8	31.8
		400/315	2237.4	-20735.3	57579.5	-264.2	3553.5	-13566.9	-86.0	511.2
Немагнітний сплав ВТ 8	Полімам-М	200/100	1162.4	-10051.9	25962.6	-3.0	30.3	73.1	-1.3	0.9
		400/315	1528.6	-13960.6	37819.1	24.5	743.9	-3395.9	-46.5	188.8
	Полімам-М	200/100	1052.4	-8849.4	22058.2	-56.5	239.6	298.9	16.8	-84.7
		400/315	791.3	-6667.1	19085.5	202.4	-1401.4	2551.6	-26.2	94.4

ДОДАТОК Б

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

1. Особливості взаємодії магнітно-абразивного інструменту з оброблюваною поверхнею в умовах кільцевої ванни / В. С. Майборода, К. О. Заставський, Р. Б. Жук. Технічна інженерія, (2(88)), 3–13. [https://doi.org/10.26642/ten-2021-2\(88\)-3-13](https://doi.org/10.26642/ten-2021-2(88)-3-13) (Здобувачем виконано експериментальну роботу та аналіз сил тертя)
2. Дослідження сил лобового опору, що виникають в магнітно-абразивному інструменті при обробленні циліндричних деталей в кільцевій ванні / Майборода В. С., Джулій Д. Ю., Бесарабець Ю. Й., Слободянюк І. В., Заставський К. О. № 2 (2022): Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні [https://doi.org/10.20998/2079-004X.2022.2\(6\).03](https://doi.org/10.20998/2079-004X.2022.2(6).03) (Здобувачем виконано експериментальну роботу та аналіз сил опору)
3. Вплив розміру деталей на сили лобового опору при магнітно-абразивному обробленні / Заставський К. О., Майборода В. С. Mechanics and Advanced Technologies. – 2022. – No. 2. – С. 168-177. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2022.6.2.264410> (Здобувачем виконано експериментальну роботу та аналіз впливу факторів оброблення на силу опору та процес формування МАІ)
4. Analysis of the forces acting from the side of the magneto-abrasive tool on parts being machined during magneto-abrasive machining in conditions of the annular bath with large working gaps / Майборода В. С., Джулій Д. Ю., Заставський К. О. Mechanics and Advanced Technologies, 7(1), 61–67. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2023.7.1.271548> (Здобувачем виконано експериментальну роботу)
5. Дослідження сил опору з боку порошкового середовища на рух деталей при магнітно-абразивному обробленні в кільцевій ванні / Майборода В. С., Джулій Д. Ю., Заставський К. О. № 2(8) (2023): Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні

[https://doi.org/10.20998/2079-004X.2023.2\(8\).16](https://doi.org/10.20998/2079-004X.2023.2(8).16) (Здобувачем виконано експериментальну роботу та аналіз впливу факторів оброблення на силу опору та процес формування МАІ)

6. Вплив форми оброблюваної деталі на сили опору при магнітно-абразивному обробленні / Заставський К. О., Майборода В. С. Технічна інженерія. 2(92) (Лис 2023), 31–38. DOI:[https://doi.org/10.26642/ten-2023-2\(92\)-31-38](https://doi.org/10.26642/ten-2023-2(92)-31-38). (Здобувачем виконано експериментальну роботу та аналіз впливу факторів оброблення на силу опору та процес формування МАІ)

Роботи апробаційного характеру:

7. Визначення динамічних навантажень при МАО в робочій зоні кільцевого типу в умовах великих магнітних зазорів / Заставський К. О., Майборода В. С., Слободянюк І. В. Інновації молоді в машинобудуванні: Збірка праць Міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених та студентів / за заг. ред. Данильченка Ю.М., д-ра техн. наук., проф. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – № 1. – 443 с. (Здобувачем виконано експериментальну роботу та аналіз динамічних навантажень)

8. Особливості взаємодії магнітно-абразивного інструменту з оброблюваною поверхнею в умовах кільцевої ванни / Заставський К.О., Майборода В.С. Збірник наукових праць X Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю «Процеси механічної обробки, верстати та інструмент», 6–9 листопада 2019 року.– Житомир : Державний університет «Житомирська політехніка», 2019. – 211 с. (Здобувачем виконано експериментальну роботу та аналіз взаємодії МАІ та деталі)

9. Вплив індукції магнітного поля на ефективний момент при магнітно-абразивному обробленні в кільцевій ванні в умовах великих магнітних зазорів / Майборода В.С., Заставський К.О., Жук Р.Б. Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво : матеріали XIX Міжнародної науково-практичної конференції (м. Суми, 25–26 листопада 2020 року) / редкол.: В. О. Залого, О. В. Івченко. – Суми : Сумський державний університет,

2020. – 183 с. *(Здобувачем виконано експериментальну роботу та аналіз сил тертя)*

10. Визначення нормальних сил при магнітно абразивному обробленні в умовах великих магнітних зазорів / Заставський К. О., Джулій Д. Ю., Майборода В. С. Інновації молоді в машинобудуванні (Youth Innovations in Mechanical Engineering): Збірка праць Міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених та студентів / за заг. ред. Данильченка Ю.М., д-ра техн. наук., проф. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – № 3. – 460 с. *(Здобувачем виконано експериментальну роботу та аналіз сил опору)*

11. Сили опору магнітно–абразивного інструменту при магнітно–абразивному обробленні циліндричних виробів в кільцевій ванні / Джулій Д. Ю., Заставський К. О., Майборода В. С., Слободянюк І. В. Збірник наукових праць XI Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю «Процеси механічної обробки, верстати та інструмент», 5–6 листопада 2021 року. – Житомир : Державний університет «Житомирська політехніка», 2021. – 191 с. *(Здобувачем виконано експериментальну роботу та аналіз сил опору)*

12. Вплив форми оброблюваної деталі на сили опору при магнітно-абразивному обробленні / Заставський К.О., Майборода В.С. Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2023) : матеріали тез доповідей XIII Міжнародної науково-практичної конференції (м. Чернігів, 25–26 травня 2023 р.) : у 2 т. / Національний університет «Чернігівська політехніка» [та ін.] ; відп. за вип.: Єрошенко Андрій Михайлович [та ін.]. – Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2023. – Т. 1. – 366 с. *(Здобувачем виконано експериментальну роботу та аналіз впливу факторів оброблення на силу опору та процес формування МАІ).*