

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

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

БУРІКОВ ОЛЕКСІЙ ОЛЕГОВИЧ

УДК 621.923

ДИСЕРТАЦІЯ
**МАГНІТНО-АБРАЗИВНЕ ПОЛІРУВАННЯ ПЛОЩИН ІНДУКТОРАМИ НА
БАЗІ ВИСОКОЕНЕРГЕТИЧНИХ МАГНІТІВ**

Спеціальність 131 – Прикладна механіка
Галузь знань 13 – Механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

_____ О.О. Буріков

Науковий керівник Майборода Віктор Станіславович, професор, доктор технічних наук, професор кафедри конструювання машин

Київ – 2025

АНОТАЦІЯ

Буріков О.О. Магнітно-абразивне полірування площин індукторами на базі високоенергетичних магнітів. – 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, 2025.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Д 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 ініціативної НДР "Освоєння нових технологій виробництва матеріалів, їх оброблення і з'єднання, створення індустрії наноматеріалів та нанотехнологій" (№ державної реєстрації 0122U000084).

В дисертаційній роботі використано методики визначення якісних параметрів оброблюваних поверхонь, що утворюються внаслідок взаємодії магнітно-абразивного інструменту (МАІ) та поверхонь заготовок, які дозволяють провести комплексну оцінку впливу складових технологічних параметрів при проведенні магнітно-абразивної оброблення (МАО) площин торцевими індукторами. Вперше визначено вплив технологічних параметрів оброблення таких як, швидкість обертання індуктора, робочий зазор, швидкість подачі, початкова шорсткість та конструктивні, такі як, тип та розмір магнітно-абразивного порошку, форма робочої поверхні індуктора, компонування індуктора. Розроблено рекомендації, щодо підбору раціональних технологічних параметрів для інтенсифікації процесу МАО, що базуються на особливостях утворення МАІ.

Експеримент виконували на установці для МАО, що реалізована на універсальному верстатному обладнанні – вертикально-фрезерному верстаті мод. 6Б75ВФ1, що дає змогу вести оброблення в умовах малих магнітних зазорів.

У якості дослідних зразків для проведення дослідження були використані феромагнітні матеріали у формі пластин розмірами 440x80x20 мм із сталі 40Х та пластин розмірами 65x8x0,8 мм із вуглецевої інструментальної сталі У9.

Для оцінки фізико-механічних та якісних параметрів поверхонь отриманих внаслідок впливу МАО було використано якісні методи – візуальний та безконтактний способи та кількісні методи – контактні та безконтактні із використання спеціальних вимірювальних приладів – мікроскопів, профілометрів та профілографів. Розроблено технологічні пристосування для закріплення та зчитування отриманих результатів оброблення. Для формування МАІ були використані наступні порошки: оскольчастий рівновісний Феромап та Царамам з розміром зерен 630/400, 400/315, 315/200, 200/100 мкм, округлі рівновісні ПР6М5 200/100 мкм, ДЧЛ 1800/1300 мкм, S330 1400/1000 мкм, оскольчасті алмазні пасти типу АСМ 40/28 мкм, 20/14 мкм, 5/3 мкм, 3/2 мкм, а також суміші на основі даних порошків.

Встановлено, що в залежності від величини фракції МАП існують раціональні значення величини магнітних зазорів, що відповідають певній величині фракції порошку, при якому відбувається ефективно оброблення та відсутній ефект шаржування. За величини зазору менше ніж 1,5 мм відбувається процес активного видалення матеріалу, але при цьому спостерігаються часті випадки шаржування. При проведенні МАО із величиною магнітних зазорів понад 5 мм оброблення не відбувається внаслідок недостатньої абразивної та магнітної взаємодії МАІ та оброблюваної поверхні. В більшості випадків раціональним значенням робочого зазору для випробуваних МАП становить близько 3-х мм.

Показано, що за швидкості подачі головки при проведенні МАО в межах 20, 30 і 50 мм/хв. Відбувається переважне видалення вершин мікронерівностей поверхні без активної обробки западин. При швидкостях подачі в межах 5-15 мм/хв виконується повне розполіровування мікропрофілю із активним видаленням елементів спадковості оброблення, отриманих внаслідок застосування первинних методів оброблення.

Визначено, відмінності в характері взаємодії між МАП та деталлю при використанні порошків округлої форми, що виконує переважно пластичне деформування поверхневого шару оброблюваної поверхні без значного видалення матеріалу заготовки.

Встановлено, що при проведенні МАО зі швидкостями обертання індуктора в межах до 1000 об/хв отримані значення шорсткості є мінімальними. Збільшення швидкості обертання індуктора понад 1000 об/хв веде до порушення механізму взаємодії МАІ із оброблюваною поверхнею – відбувається активне просковзування та проворот частинок МАП відносно оброблюваної поверхні, що не забезпечує сприятливих умов для протікання процесів полірування та мікрорізання, тобто МАІ не встигає відновлювати свою форму у магнітному полі, а й відповідно не виконує активного видалення матеріалу.

Результатами моделювання магнітних полів за різного компонування індуктора доведено, що раціональною конструкцією є головка з одним великим магнітом завдяки більшій однорідності поля, енергоефективності, простоті управління, меншій складності та низьким ризиками механічних збоїв. Така конструкція дозволяє досягти стабільних та прогнозованих результатів оброблення та вимірювань.

Досліджено множину варіацій робочих поверхонь індуктора. Встановлено, що найраціональнішою конструкцією робочої поверхні торцевої головки з МАІ типу щітка є поверхня, що містить у своїй будові 9 – 12 променеподібних виступів трикутної форми. Використання подібних головок дозволяє забезпечувати формування шорсткості оброблених поверхонь з $Ra < 0,03$ мкм при вихідній Ra на рівні 0,8 мкм. При цьому практично повністю усувається мікрохвилястість, що формується внаслідок попередніх методів оброблення. За характером зміни величини відносної опорної поверхні мікропрофілю проаналізовано кінетику його формування. Показано, що на початковому етапі відбувається переважне видалення мікрОВиступів із подальшим активним обробленням мікрОВпадин та вигладжуванням мікропрофілю.

Встановлено, що найбільші значення стискаючих залишкових напружень, до 100 МПа, формуються після МАО плоских поверхонь індукторами типу "щітка" на базі постійних високоенергетичних магнітів з використанням округлих порошкових матеріалів, які забезпечують переважне пластичне деформування поверхневого шару, його мікронаклепування без значного видалення матеріалу, яке притаманне МАО порошками з осколковою формою частинок типу Феромап.

Показано, що найбільше значення збільшення ступеню наклепу знаходиться на глибині 5–5,5 мкм. При цьому зростання ступеню наклепу понад 35% відбувається після МАО зразків порошками з найменшими радіусами округлення різальних кромek – таких як Феромап – 30–60 мкм та Царамам – 10–50 мкм. Встановлено, що зміна твердості по глибині не є рівномірною. Результати демонструють, що після МАО порошком Феромап відбувається зростання твердості на глибині 120 – 320 мкм, в той час як після проведення МАО порошком Царамам зростання твердості в поверхневому шарі відбувається на глибині 100 – 150 мкм. Найбільші значення підвищення твердості в поверхневому шарі матеріалу зразків на глибині до 200 мкм має місце після виконання МАО округлим порошком S330 з розміром частинок 1200/900 мкм, який виконує переважне пластичне деформування поверхневого шару. Отримані результати взаємозалежні із даними отриманими при визначенні залишкових напружень – найбільше зростання показника твердості в поверхневому шарі відповідає найбільшим залишковим напруженням.

Пояснення зазначеному факту пов'язано з структурною і дефектною перебудовами матеріалу зразків і потребує подальших ретельних мікроструктурних досліджень.

Вперше встановлено, що для МАО із використанням сферичних порошків, характерним є відносно низький рівень зниження шорсткості, за рахунок форми поверхні МАП, яка не має множини різальних кромek, а при обробленні поверхонь такими порошками спостерігається високий вплив на поверхневі напруження внаслідок інтенсивної ударно-фрикційної взаємодії.

Встановлено, що застосування сумішей МАП для проведення МАО забезпечують зниження рівня мікрохвилястості поверхні. Про це свідчать

положення зон на кривих залежності зміни величин t_p від рівня відносних висот профілю p , де відбувається перехід від мікровиступів до мікрозападин профілю поверхонь. Для сумішей порошків Феромап з розміром частинок 630/400 і 315/200 мкм розташування зазначених зон зміщується від відносного рівня перетину $p=25,5\%$ після оброблення МАП із розміром частинок 630/400 мкм до рівня $p=50\%$ при використанні сумішей порошків з розміром частинок 630/400 і 315/200 мкм за умов зростання вмісту відносної кількості дрібної фракції і суміші до 0,4. Використання при MAO інструменту, який сформований із суміші крупних округлих частинок порошку ДЧ 1800/1300 мкм із дрібними оскольчастими частинками порошку Феромап з розмірами частинок 630/400, 315/200 і 200/100 мкм дозволяє за умов оброблення із раціональними значеннями робочих зазорів встановити, що як і у випадку використання оскольчастих МАП величина робочого зазору не має значного впливу на вихідні параметри шорсткості, що підтверджує попередні результати досліджень.

Показано, що найкращі результати оброблення отримано при використанні сумішей округлих порошків ДЧ 1800/1300 мкм і оскольчастих Феромап 630/400 мкм при їх співвідношенні в МАІ 1:1. За таких умов оброблення округлі крупні порошки, виконують роль рухомо-скоординованого притиру, передаючи силове навантаження на дрібні частинки. При цьому у процесі взаємодії з оброблюваною поверхнею крупні округлі частинки забезпечують як пластичне деформування мікронерівностей поверхні, так і безпосередньо поверхневого шару.

Доведено, що формування МАІ з порошку ДЧ 1500/1300 мкм та алмазних паст типу АСМ дозволило встановити, що найкраща поліруюча спроможність відповідає МАІ, який сформовано з порошку ДЧ 1500/1300 мкм з додаванням паст АСМ із розміром зерен 5/3 мкм. При цьому отримано шорсткість оброблених поверхонь з R_a на рівні 0,03 - 0,04 мкм.

Результати роботи дозволили уточнити механізм формування МАІ на основі сумішей і особливості його взаємодії з поверхнями типу площина в умовах малих магнітних зазорі, що зробило можливим розширення номенклатури застосування методу MAO і підвищення його ефективності і продуктивності.

Ключові слова: Магнітно-абразивне оброблення (МАО), Магнітно-абразивний порошок (МАП), Магнітно-абразивний інструмент (МАІ), шорсткість, опорна поверхня, полірування, поверхнева твердість, залишкові напруження, різання, режими різання, технологічний процес, індуктор, інноваційний процес, МАО в умовах малих магнітних зазорів, магнітне поле, ударно-фрикційна взаємодія, рухомо-скоординований притир, МАО феромагнітних деталей, деформація, пластичне деформування, механічна суміш.

ABSTRACT

Burikov O.O. Magnetic-abrasive polishing of planes with inductors based on high-energy magnets. – Qualification scientific work in the form of a manuscript.

Thesis for the scientific degree of 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, 2025.

The dissertation uses methods for determining the qualitative parameters of the processed surfaces, which are formed as a result of the interaction of the magnetic-abrasive tool (MAT) and the surfaces of the workpieces, which allow for a comprehensive assessment of the influence of the constituent technological parameters during magnetic-abrasive finishing (MAF) of planes with end inductors. For the first time, the influence of technological processing parameters such as the inductor rotation speed, working gap, feed rate, initial roughness and design parameters such as the type and size of magnetic abrasive powder, the shape of the inductor working surface, and the inductor layout was determined. Recommendations were developed for the selection of rational technological parameters for the intensification of the MAF process, based on the features of the formation of MAT.

The experiment was performed on a MAF installation implemented on universal machine tool equipment - a vertical milling machine mod. 6B75VF1, which allows processing in conditions of small magnetic gaps.

As experimental samples for the study, ferromagnetic materials in the form of plates measuring 440x80x20 mm from 40X steel and plates measuring 65x8x0.8 mm from U9 carbon tool steel were used.

To assess the physical, mechanical and qualitative parameters of surfaces obtained as a result of the influence of MAF, qualitative methods were used - visual and non-contact methods and quantitative methods - contact and non-contact using special measuring instruments - microscopes, profilometers and profilographs. Technological devices were developed for fixing and reading the obtained processing results. The following powders were used to form the MAT: fragmented equiaxed Feromap and Tsaramam with grain sizes of 630/400, 400/315, 315/200, 200/100 μm , rounded equiaxed PR6M5 200/100 μm , CIS (cast iron shot) 1800/1300 μm , S330 1400/1000 μm , fragmented diamond pastes of the DSP (diamond submicropowders) type 40/28 μm , 20/14 μm , 5/3 μm , 3/2 μm , as well as mixtures based on these powders. It was established that depending on the size of the MAP (magnetic abrasive powder) fraction, there are rational values of the magnetic gaps corresponding to a certain size of the powder fraction, at which effective processing occurs and there is no cartooning effect. At a gap size of less than 1.5 mm, the process of active material removal occurs, but frequent cases of chamfering are observed. When performing MAF with a magnetic gap size of more than 5 mm, processing does not occur due to insufficient abrasive and magnetic interaction of the MAT and the surface being processed. In most cases, the rational value of the working gap for the tested MAP is about 3 mm.

It is shown that at the feed rate of the head during MAF within 20, 30 and 50 mm/min. There is a predominant removal of the tops of surface micro-roughnesses without active processing of depressions. At feed rates within 5-15 mm/min, complete polishing of the micro-profile is performed with active removal of processing inheritance elements obtained as a result of the use of primary processing methods.

It was determined that there are differences in the nature of the interaction between the MAT and the part when using round powders, which perform mainly plastic deformation of the surface layer of the treated surface without significant removal of the workpiece material.

It was established that when conducting MAF with inductor rotation speeds within the range of up to 1000 rpm, the obtained roughness values are minimal. An increase in the inductor rotation speed above 1000 rpm leads to a violation of the mechanism of interaction of the MAT with the treated surface - active sliding and rotation of the MAP particles relative to the treated surface occurs, which does not provide favorable conditions for the polishing and microcutting processes, i.e. the MAT does not have time to restore its shape in the magnetic field, and accordingly does not perform active material removal.

The results of modeling magnetic fields with different inductor layouts have proven that the rational design is a head with one large magnet due to greater field uniformity, energy efficiency, ease of control, lower complexity and low risk of mechanical failures. Such a design allows achieving stable and predictable processing and measurement results.

A variety of variations of the inductor working surfaces have been studied. It has been established that the most rational design of the working surface of the end head with a brush-type MAT is a surface containing 9-12 radial protrusions of a triangular shape in its structure. The use of such heads allows for the formation of a roughness of the processed surfaces with $Ra < 0.03 \mu\text{m}$ at the initial Ra at the level of $0.8 \mu\text{m}$. At the same time, the microwaviness formed as a result of previous processing methods is almost completely eliminated. The kinetics of its formation were analyzed by the nature of the change in the value of the relative support surface of the microprofile. It was shown that at the initial stage, the predominant removal of microprotrusions occurs with subsequent active processing of microcavities and smoothing of the microprofile.

It was established that the largest values of compressive residual stresses, up to 100 MPa, are formed after MAF of flat surfaces by "brush" type inductors based on permanent high-energy magnets using rounded powder materials, which provide predominant plastic deformation of the surface layer, its microhardening without significant removal of material, which is inherent in MAF using powders with a fragmentary shape of particles of the Feromap type.

It was shown that the largest value of the increase in the degree of hardening is at a depth of 5–5.5 μm . At the same time, the increase in the degree of hardening by more than 35% occurs after MAP of samples with powders with the smallest radii of rounding of cutting edges - such as Feromap - 30–60 μm and Tsaramam - 10–50 μm . It was established that the change in hardness along the depth is not uniform. The results demonstrate that after MAF with Feromap powder, hardness increases at a depth of 120–320 μm , while after MAF with Tsaramam powder, hardness increases in the surface layer at a depth of 100–150 μm . The largest values of the increase in hardness in the surface layer of the sample material at a depth of up to 200 μm occur after MAF with rounded S330 powder with a particle size of 1200/900 μm , which performs the predominant plastic deformation of the surface layer. The obtained results are interrelated with the data obtained when determining residual stresses - the greatest increase in the hardness index in the surface layer corresponds to the greatest residual stresses.

The explanation of this fact is associated with the structural and defect rearrangements of the sample material and requires further careful microstructural studies.

It was first established that for MAF using spherical powders, a relatively low level of roughness reduction is characteristic, due to the shape of the MAP surface, which does not have a set of cutting edges, and when processing surfaces with such powders, a high impact on surface stresses is observed due to intensive shock-friction interaction.

It was established that the use of MAP mixtures for MAF provides a decrease in the level of surface microwaviness. This is evidenced by the position of the zones on the curves of the dependence of the change in the values of t_p on the level of relative heights of the profile p , where the transition from microprotrusions to microdents of the surface profile occurs. For mixtures of Feromap powders with particle sizes of 630/400 and 315/200 μm , the location of the indicated zones shifts from the relative level of intersection $p=25.5\%$ after processing MAP with particle sizes of 630/400 μm to the level $p=50\%$ when using mixtures of powders with particle sizes of 630/400 and 315/200 μm under the conditions of increasing the content of the relative amount of fine fraction and the mixture to 0.4. The use of a tool for MAF, which is formed from a mixture of large

rounded particles of powder DC 1800/1300 μm with small fragmented particles of powder Feromap with particle sizes of 630/400, 315/200 and 200/100 μm , allows, under processing conditions with rational values of working gaps, to establish that, as in the case of using fragmented MAP, the value of the working gap does not have a significant effect on the initial roughness parameters, which confirms the previous results of the studies. It is shown that the best processing results were obtained when using mixtures of rounded powders CIS 1800/1300 μm and fragmented Feromap 630/400 μm at their ratio in MAT 1:1. Under such processing conditions, rounded large powders play the role of a motion-coordinated lapping, transferring the force load to small particles. At the same time, in the process of interaction with the treated surface, large rounded particles provide both plastic deformation of the surface micro-irregularities and the surface layer itself.

It has been proven that the formation of MAT from 1500/1300 μm CIS powder and DSP-type diamond pastes made it possible to establish that the best polishing ability corresponds to MAI, which is formed from 1500/1300 μm CIS powder with the addition of DSP paste with a grain size of 5/3 μm . At the same time, the roughness of the treated surfaces with Ra at the level of 0.03 - 0.04 μm was obtained.

The results of the work allowed to clarify the mechanism of MAT formation based on mixtures and the features of its interaction with plane-type surfaces in conditions of small magnetic gaps, which made it possible to expand the range of application of the MAF method and increase its efficiency and productivity.

Keywords: Magnetic abrasive finishing (MAF), Magnetic abrasive powder (MAP), Magnetic abrasive tool (MAT), roughness, support surface, polishing, surface hardness, residual stresses, cutting, cutting modes, technological process, inductor, innovative process, MAF in conditions of small magnetic gaps, magnetic field, shock-friction interaction, motion-coordinated lapping, MAF of ferromagnetic parts, deformation, plastic deformation, mechanical mixture.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

1. Оброблення плоских поверхонь магнітно-абразивним методом торцевими головками з постійних магнітів 3. Вплив типу робочих головок на ефективність магнітно-абразивного оброблення. / В. С. Майборода, Д. Ю. Джулій, А. И. Зелінко, О. О. Буріков // Mechanics and Advanced Technologies. – 2021. – No. 1. – С. 97-102. – Бібліогр.: 14 назв.
<https://doi.org/10.20535/2521-1943.2021.5.1.229813> *(Здобувачем виконано експериментальну роботу по підготовці та верстатному обробленні дослідних зразків)*
2. Flat surfaces machining by the magneto-abrasive method with permanent magnet end-type heads. The influence of the design of the working surfaces of the heads on the effectiveness of the magneto-abrasive machining. / В. С. Майборода, Д. Ю. Джулій, А. И. Зелінко, О. О. Буріков // Mechanics and Advanced Technologies. – 2020. – No. 3. – С. 73-81
<https://doi.org/10.20535/2521-1943.2020.0.208535> *(Здобувачем виконано моделювання множини конструкцій головок та проведено оброблення дослідних зразків)*
3. Вплив магнітно-абразивного оброблення на характеристики поверхневого шару плоских деталей. / Буріков О.О., Джулій Д.Ю., Майборода В.С. // Mechanics and Advanced Technologies. – 2022. – No. 3. – С. 286-292. – Бібліогр.: 18 назв.
<https://doi.org/10.20535/2521-1943.2022.6.3.265948> *(Здобувачем підготовано оснащення для вимірювання мікротвердості та виконано вимірювання мікротвердості дослідних зразків на мікротвердомірі ПМТ-3)*
4. Магнітно-абразивне оброблення плоских поверхонь феромагнітних деталей торцевими головками на базі високоенергетичних магнітів / Майборода В.С., Буріков О.О. // Технічні науки та технології. – 2024. №4 (38). – с. 16-21

[https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-4\(38\)-16-21](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-4(38)-16-21) (Здобувачем виконано оброблення дослідних зразків та проаналізовано отримані значення шорсткості та поверхневих напружень поверхонь зразків)

5. Formation of a microprofile of product surfaces during magneto-abrasive finishing of planes with heads based on high-energy permanent magnets / D. Dzhulii, V. Maiboroda, O. Burikov, and O. Belajev // Mechanics and Advanced Technologies, vol. 9, no. 1(104), 2025

[https://doi.org/10.20535/2521-1943.2025.9.1\(104\).324280](https://doi.org/10.20535/2521-1943.2025.9.1(104).324280) (Здобувачем виконано підготовку та змішування сумішей розхідних матеріалів для проведення експериментів)

Роботи апробаційного характеру:

6. Особливості магнітно-абразивного оброблення плоских поверхонь феромагнітних деталей торцевими головками на базі високопотужних магнітів. / Майборода В.С., Буріков О.О., Джулій Д.Ю., Слободянюк І.В. / Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XXII Міжнародної науково-технічної конференції 28 – 30 травня 2024 року / за заг. ред. В. Д. Ковальова. — Краматорськ-Тернопіль: ДДМА, 2024. — С.128-131. (Здобувачем виконано підготовку дослідних зразків у вигляді мікрошліфів)

7. Вплив геометрії магнітів на властивості магнітно-абразивного інструменту. / О.О. Буріков, І.В. Слободянюк, В.С. Майборода / Інновації молоді в машинобудуванні. Матеріали міжнародної науково-технічної конференції. Київ, 2024. (Здобувачем виконано моделювання розподілу магнітних полів у програмному забезпеченні Ansys Maxwell)

8. Моделювання розподілення магнітних сил, що виникають в робочих зазорах головок торцевого типу на базі постійних високо потужних магнітів в залежності від їх розташування і конструкції. / Буріков О.О., Майборода В.С. / Сучасні питання виробництва та ремонту в промисловості і на транспорті: Матеріали Міжнародного науково-технічного семінару, 26–27 березня 2024 р. – Київ: АТМ України, 2024.- с.11-14. (Здобувачем

виконано моделювання впливу матеріалу хвостовика індуктора на розподіл магнітних полів у програмному забезпеченні Ansys Maxwell)

9. Магнітно-абразивне оброблення плоских поверхонь зразків зі сталі 40Х торцевими індукторами на основі постійних магнітів . Процеси механічної обробки, верстати та інструмент. / Буріков О.О., Джулій Д.Ю., Майборода В.С. / Збірник наукових праць XII Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю м. Житомир, 9–10 листопада 2023 р.с.53-56. *(Здобувачем виконано оброблення заготовок та зразків на фрезерувальному обладнанні)*

ЗМІСТ

ВСТУП.....	17
РОЗДІЛ 1_АНАЛІЗ НАУКОВО ТЕХНІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ В ОБЛАСТІ ФІНІШНИХ МЕТОДІВ ОБРОБЛЕННЯ ПОВЕРХОНЬ ЗА ДОПОМОГОЮ СПЕЦІАЛЬНИХ ТА МАГНІТНО-АБРАЗИВНИХ ІНСТРУМЕНТІВ.....	23
1.1 Огляд фінішних методів оброблення	23
1.2 Процес МАО та його особливості	28
1.3 Аналіз факторів, що безпосередньо впливають на процес формування МАІ	29
1.4 Огляд застосування магнітно-абразивного оброблення та особливості формування МАІ	35
РОЗДІЛ 2_МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРИ ФОРМУВАННІ ПОВЕРХОНЬ ПРИ МАГНІТНО- АБРАЗИВНОМУ ОБРОБЛЕННІ	59
2.1 Матеріал досліджень.....	60
2.2 Визначення типу і матеріалу постійного магніту для його застосування при створенні торцевої головки.....	61
2.2 Верстатне обладнання для проведення експериментальних досліджень та параметри механічної обробки	65
2.3 Підготовка індуктора для полірування площин.....	74
2.5 Підготовка зразків та вимірювання параметрів обробленого поверхневого шару	86
2.5.1 Вимірювання величини деформації зразка та напружень у поверхневому шарі	86
2.5.2 Вимірювання поверхневої мікротвердості обробленого шару матеріалу зразків	90
2.5.3 Обґрунтування вибору торцевої поверхні індуктора	92

РОЗДІЛ 3_ВПЛИВ МАО НА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТА МІКРОГЕОМЕТРИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБРОБЛЮВАНИХ ПОВЕРХОНЬ	97
3.1 Вплив величини робочого зазору на параметри шорсткості та характеристики опорної поверхні деталей	98
3.2 Вплив швидкості обертання та подачі на параметри шорсткості поверхні деталей	101
3.3 Вплив на шорсткість поверхні та характеристики опорної поверхні деталей розміру, виду фракції МАП та початкової шорсткості.....	111
3.4 Вплив на шорсткість та стан опорної поверхні деталей після МАО із застосуванням композиційного складу МАП	121
3.5 Вплив на шорсткість та стан опорної поверхні при проведенні МАО сумішшю порошків із алмазним абразивом	127
3.6 Вплив магнітно-абразивного оброблення на фізико-механічні параметри поверхневого шару обробленого матеріалу	105
3.7 Механізм взаємодії суміші округлих порошків та нерівновісних осколькочастих	132
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	135
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	137

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ НА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬСкорочення

1. Скорочення

МАП – магнітно-абразивний порошок;
 МАІ – магнітно-абразивний інструмент;
 МАО – магнітно-абразивне оброблення;
 КНБ - карбіди нітриди борида;
 ОАП – оброблення абразивним потоком;
 МРО – магнітно-реологічне оброблення;
 ЕХО – електро-хімічне оброблення;
 МС - Мікроелектромеханічні системи;

2. Умовні позначення

Ra – середнє арифметичне відхилення профілю (середнє арифметичне абсолютних значень відхилень профілю в межах базової довжини), мкм;
 Rq – квадратний корінь із суми квадратів окремих висот і глибин із середньої лінії, мкм;
 Rz – висота нерівностей профілю по 10 точках (сума середніх абсолютних значень висот п'яти найбільших виступів і глибин п'яти найбільших впадин профілю в межах базової довжини), мкм;
 Sa – середнє арифметичне абсолютної ординати Z (X, Y) в межах області оцінювання, мкм;
 Sp – максимальне значення висот, мкм;
 Sv – максимальне значення глибин, мкм;
 t_p – відносна опорна довжина профілю (відношення опорної довжини профілю до базової довжини);
 p — значення рівня перерізу профілю;

ВСТУП

Актуальність роботи. Стрімкий розвиток та іноваційні рішення в машинобудуванні, нарівні, із оптимізацією вже відомих методів виробництва, покликані задовольняти нові вимоги споживача до якості та фізико-механічних параметрів деталей у інструментальній, формовочній, медичній техніці, авіації, оптиці та астрономії. Зі збільшенням складності форми від плоских і обертально-симетричних поверхонь до асиметричних поверхонь вільної форми, виробничі зусилля значно зростають. Для забезпечення вимог виробничих процесів виконують наступні види вископродуктивних та точних методів оброблення, до яких належать надточні процеси (шліфування, токарна обробка, фрезерування), абразивні процеси (притирка, вібраційне шліфування, притирання потоком тиску, ручне полірування, магнітореологічне полірування), процеси дробоструменевої обробки (полірування лазерним або електронним променем), електрохімічне полірування та багато інших. Звичайні технології фінішної обробки часто стикаються з обмеженнями у досягненні високої якості поверхні, зокрема в аспектах макрогеометрії, рельєфу та властивостей приповерхневої зони, а також мають недоліки, притаманні самому процесу. Зокрема, низька продуктивність більшості таких процесів є основним обмеженням для їх широкого застосування. Незважаючи на це, ці технології, іноді з включенням етапів, що потребують ручної праці досі використовуються в промисловості через відсутність альтернатив. Магнітно-абразивне полірування є спеціальною технологією фінішної обробки, яка використовує абразивні частинки з невизначеною геометрією або з дуже слабким зв'язком зерен і може бути конкурентоспроможною альтернативою багатьом традиційним методам [1-3]. Зараз магнітно-абразивне полірування застосовується як вузько-направлена технологія, наприклад, для попередньої та фінішної обробки різальних інструментів в промисловості.

В роботі поставлено за мету дослідити важливе питання: чи може магнітно-абразивне оброблення (МАО) забезпечити достатньо високі рівні технологічності та бажані фізико-механічні властивості для промислового застосування, використовуючи новітні наукові відкриття та методи для виконання високоточних

робіт? У літературі відома велика різноманітність кінематичних схем реалізації процесу магнітно-абразивного полірування. У більшості випадків використання нової технології обробки здійснюється на окремому устаткуванні, що часто негативно впливає на гнучкість обладнання та економічні фактори. Основною ідеєю для просування МАО у виробництво є те, що за використання незначних модифікацій наявного універсального обладнання або обробних центрів проводити автоматизоване полірування після різних видів механічного оброблення уникаючи витрат на придбання систем для фінішної технології або ручної роботи. Майбутні розробки нових матеріалів з підвищеною постійною намагніченістю можуть відкрити нові перспективи для розвитку магнітно-абразивного полірування. Наразі існує лише обмежена кількість наукових досліджень у цій сфері. Фундаментальний, детальний і практично орієнтований дослідницький внесок у цю тему поки що відсутній, і саме це буде розглянуто у даній роботі. Додатково, буде представлено інноваційне рішення для підвищення інтенсивності процесу магнітно-абразивного полірування плоских поверхонь феромагнітних заготовок шляхом вдосконалення механічного ущільнення порошку в робочому зазорі. У цьому дослідженні буде проаналізовано вплив параметрів процесу, структури порошків, типів інструментів МАО, модифікацій процесу, властивостей та параметрів, а також фізико-механічного стану оброблюваних поверхонь заготовок. Таким чином, ця робота стане основою для подальших досліджень у сфері магнітно-абразивного полірування на універсальному верстатному обладнанні.

Мета і задачі дослідження

Мета роботи: Формування інструментального середовища при магнітно-абразивному обробленні площин індукторами торцевого типу на базі високоенергетичних магнітів та дослідження явищ, що виникають у процесі оброблення з урахуванням впливу технологічних умов процесу, магнітореологічних характеристик, форми та складу МАІ, розмірів МАП та матеріалу оброблюваних деталей.

Задачі:

1. Виконати аналіз наявної інформації про використання МАО, особливості формування мікрогеометрії і фізико-механічних властивостей оброблюваних поверхонь та явищ, що супроводжують особливості трибо-механічної взаємодії, вплив властивостей МАІ та технологічних факторів процесу МАО на результати оброблення.

2. Розробити методику вимірювання фізико-механічних та якісних параметрів оброблюваних поверхонь, які мають місце при взаємодії магнітно-абразивного інструменту з оброблюваними деталями та синтезувати конструкції для формування МАІ. Визначити необхідні для дослідження матеріали та форми інструменту, розхідні матеріали (порошки) та їх тип і склад для формування МАІ.

3. Провести комплексні дослідження зміни фізико-механічних та якісних параметрів оброблюваної деталі та вплив складових МАІ. Визначити вплив факторів технологічного характеру на оброблення.

4. Дослідити характер зміни параметрів оброблюваних поверхонь, що мають місце при взаємодії оброблюваної деталі та МАІ в реальних умовах процесу МАО.

5. Встановити вплив властивостей матеріалу, розміру та форми частинок магнітно-абразивного порошку на характер взаємодії між оброблюваною деталлю та МАІ з урахуванням зміни технологічних факторів процесу оброблення. Розробити рекомендації по ефективному фінішному обробленню деталей методом МАО.

Об'єкт дослідження – магнітно-абразивне полірування площин на універсальному верстатному обладнанні в умовах роботи в малих магнітних зазорах.

Предмет досліджень – фізико-механічні показники, яких набуває оброблювана деталь та вплив складових МАІ при реалізації МАО в малих магнітних зазорах плоского типу.

Методи дослідження – для розв'язання поставлених задач дослідження було використано основні положення теорії магнітного поля, магнетизму, механіки контактної взаємодії, теорії різання матеріалів, трибології, теоретичної механіки, кінематики, матеріалознавства. Експериментальні дослідження проведено на наявному верстатному обладнанні в лабораторних умовах з використанням сучасних та комп'ютеризованих засобів вимірювання.

Наукова новизна одержаних результатів

Розроблено експериментально-теоретичні положення та рекомендації для забезпечення підвищення ефективності оброблення площин методом МАО індукторами торцевого типу на базі високоенергетичних магнітів на універсальних верстатах, які базуються на аналізі умов формування МАІ, факторів (процесів), що їх супроводжують в умовах малих магнітних зазорів:

1) Вперше встановлено основні закономірності, що мають місце при формуванні МАІ і його взаємодії з оброблюваними поверхнями при МАО плоских деталей виготовлених з феромагнітних матеріалів з урахуванням зміни технологічних факторів, таких як потужність (індукція) магнітного поля, швидкість рухів при обробленні, типу, форми, розміру частинок, відсоткового відношення складових МАП. Визначено вплив зазначених факторів на значення якісних параметрів, що отримуються в процесі оброблення площин МАІ при МАО.

2) Вперше досліджено доцільність застосування різних типів ферабразивних порошкових матеріалів та сумішей порошків при полірування площин виробів індукторами на базі високоенергетичних магнітів в умовах малого робочого зазору і особливостей формоутворення МАІ при взаємодії з

оброблюваними поверхнями при МАО з урахуванням характеристик оброблюваної деталі та властивостей магнітно-абразивних порошків.

3) Експериментально підтверджено теоретичні припущення, щодо впливу властивостей МАІ та технологічних факторів процесу МАО на певні показники якості оброблюваних поверхонь.

4) Запропоновано рекомендації та уточнення щодо особливостей механізму структуроутворення МАІ та процесів, які відбуваються в поверхневому шарі заготовки в процесі реалізації МАО в умовах малих магнітних зазорів, що забезпечило розширення можливостей методу і підвищення його ефективності і продуктивності.

Особистий внесок здобувача

Автором синтезовано мету та задачі, що розглядаються в дисертаційній роботі. Запропоновано методику дослідження формування та впливу структурних параметрів МАІ при виконанні МАО в малому магнітному зазорі плоского типу та розроблено необхідне для цього оснащення. Виконано постанову роботи, методів та засобів для досягнення визначеної мети, проведено моделювання, експериментальні напрацювання, аналіз та узагальнення отриманих результатів. Матеріали дисертаційної роботи не містять результатів, що належать співавторам, з якими були написані роботи. В роботі використовуються посилання на авторів і відповідні джерела при описанні відомих теоретичних положень та експериментальних даних.

Публікації. За основними результатами дисертаційної роботи опубліковано 5 статей у провідних фахових виданнях в Україні. Результати дослідження також представлено в 4 тезах доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертація має наступну структуру: вступ, 3 розділи, загальні висновки, список використаних джерел із 71 найменування на 145 сторінках. Основний текст дисертації викладено на 145 друкованих сторінках, що містить 88 рисунків, 10 таблиць. Повний обсяг дисертації становить 145 сторінок.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ НАУКОВО ТЕХНІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ В ОБЛАСТІ ФІНІШНИХ МЕТОДІВ ОБРОБЛЕННЯ ПОВЕРХОНЬ ЗА ДОПОМОГОЮ СПЕЦІАЛЬНИХ ТА МАГНІТНО-АБРАЗИВНИХ ІНСТРУМЕНТІВ

1.1 Огляд фінішних методів оброблення

1.1.1 Притирання

Притирання — це процес, який використовують для досягнення точності в механічних конструкціях і деталях шляхом легкого затирання або шліфування поверхонь. Його мета — досягти певного контакту між поверхнями, зменшити зазори, покращити складання деталей. Притирання застосовується в таких сферах, як машинобудування, виготовлення двигунів і точна механіка. Процес зазвичай включає використання абразивних матеріалів або спеціальних паст для точної підгонки деталей. Це може бути особливо важливим у випадках, коли необхідно забезпечення високої точності зборки і в подальшому підвищеної надійності у роботі механізмів. Притирання виконується сипучим зерном, в рідинному стані або пастоподібному середовищі. Співвідношення змішування складових зазвичай приймають в межах від 1:10 до 1:2 [4]. В якості різальних матеріалів використовуються високотверді матеріали, такі як алмаз або КБН, а також звичайні матеріали, такі як корунд і карбід кремнію з розміром зерна від 1 до 250 мкм [5].

Різальні абразивні частинки вільно переміщуються в середовищах, таких як олія, парафін, вазелін або керосин. Притиральний агент безперервно подається в зону оброблення із витратою в межах 1 до 10 л/год. Оброблювані поверхні розміщуються між правильним кільцем та притиральним диском. І притиральний диск, і правильне кільце із заготовками обертаються в протилежних напрямках один відносно одного, аналогічно кінематиці планетарної передачі. Загальна швидкість різання становить від 50 до 500 м/хв і обмежується відцентровою силою. Притиральна суміш вдавлюється в притиральний диск або під дією сили тяжіння компонентів, або, для менших заготовок, за допомогою притискних пластини навантаження або в результаті дії пневматичних приводів. Площинність притирального диска має великий вплив на точність розмірів компонента і, залежно

від необхідного ступеня твердості, складається із різних матеріалів, таких як чавуни, загартовані сталі, кераміка, мідь, пластик або фетру. Раціональний вибір оправки забезпечує високу точність розмірів притирального диска, рівномірний розподіл притирального елемента і відведення тепла. При плоскопаралельному притиранні заготовки обробляються з двох сторін одночасно. Використовуються два притиральних диски, що сприяє збільшенню вартості машини, а також створює дуже жорсткі допуски. Окрім торцевого притирання також виконують зовнішнє кругле, внутрішнє кругле, гвинтове, прокатне та профільне. Притиранням обробляються плоскі, циліндричні та обертально-симетричні поверхні. Складні поверхні вільної форми не можна обробити притиркою з кінематичних причин. Типове застосування притирки: Обробка штампованих деталей, паралельних калібрів, деталей для вимірювальних приладів, ущільнень, поршневих і муфтових кілець, отворів втулок і гільз [6-9]. При обробці циліндричних сталевих роликів (сталь 1.3505) оцінювали за значущістю фактори, що впливають на якість одержуваної поверхні: сили притискання, концентрація абразивних зерен у притирочному засобі та швидкість різання [10]. Температура процесу також має вплив на товщину шару пошкодженої крайової зони і може, наприклад, бути знижена до 20% при обробці германію зі зниженням температури від 40 °C до -10 °C [11].

Переваги процесу: Притирання дозволяє досягти високої якості поверхні (до $R_z = 0,05$ мкм [5]) і точних допусків на форму (площинність до 0,1 мкм, паралельність до 0,5 мкм [12]). Подібно до хонінгування, на заключному етапі обробки використовуються дуже дрібні абразивні частинки, що сприяє збільшенню корисної площі поверхні, що задіяна в процесі. Тиск частинок зміцнює приповерхневий шар оброблюваного матеріалу на глибині 4–24 мкм [8]. Водночас процес дозволяє отримати поверхню без пошкоджень і слідів обробки при дуже низьких температурах. Оскільки деталі не потребують міцного закріплення у робочій зоні, притирання може застосовуватись для обробки тонких заготовок, товщина заготовок при цьому може бути товщиною менше 0,1 мм.

Недоліки процесу: Притирання супроводжується значним зносом і дробленням абразивних частинок внаслідок тертьової взаємодії. Для забезпечення постійної та рівномірної обробки потрібно постійно вводити нові абразивні частинки. Ще один недолік полягає в тому, що сильне тертя забруднює поверхню абразивними частинками, утворюючи густий шліфувальний шлам, який потрібно відводити із зони оброблення та утилізувати як небезпечні відходи. Крім того, притирання не підходить для обробки вільних форм [6, 8, 12].

1.1.2 Притирання потоком речовини під тиском

При притиранні під тиском, міжнародно відомому як обробка абразивним потоком (ОАП), суміш в'язкопружного полімеру та абразивних частинок переміщується гідравлічно в одному або обох напрямках у закритому робочому просторі, який утворює внутрішній контур заготовки або обмежений зовнішній контур з формою інструменту. Поліборосиліконовий гель або силіконовий каучук часто використовують як полімери, а класичні абразивні зерна, такі як карбід кремнію, оксид алюмінію, кубічний нітрид бору та полікристалічний алмаз часто використовують як абразиви. Залежно від тиску, що створюється, механізм видалення характеризується більшою мірою мікрообробкою або пластичною деформацією [13], оскільки в'язкість в'язкопружної абразивної суміші регулюється тиском.

Крім того, на в'язкість абразивної суміші істотно впливає вміст абразивних частинок, фракція зерен та температура [14]. Щоб досягти збільшення швидкості видалення, яка часто є низькою при класичній ОАП, вживаються різні заходи (вібраційне збудження або надання обертового руху заготовці). Також відомо застосування комбінації процесів МРО, МАО, ЕХО [13, 14]. Притирання потоком під тиском спочатку було розроблено для видалення задирок і обробки отворів будь-якої форми та складності в гідравлічних і паливних компонентах літаків [37]. Сьогодні, наприклад, отвори малого діаметру (до 0,3 мм) у датчиках МС, паливних форсунках, соплах принтерів промислового та побутового призначення або навіть зовнішніх поверхнях, таких як зуби конічних шестерень і лопатки турбін двигунів,

обробляються за допомогою ОАП [13]. Типові параметри процесу для ОАП наведені в таблиці 2.3.

Таблиця 1.1 - Типові параметри процесу для АСМ [39-42]

Параметр	Значення	Одиниці виміру
Тиск	5-80	МПа
Кількість циклів	400	-
Тривалість циклу	1-10	хв.
Частка абразиву	50-60	%

Якість поверхні заготовки описується макрогеометрією, топографією та фізико-механічним станом поверхні (рис. 1.1). Макрогеометрія включає точність форми (площинність, паралельність тощо) і хвилястість. Топографія описується двовимірними параметрами шорсткості (наприклад, середнім арифметичним R_a , середнім квадратичним R_q , середньою глибиною шорсткості R_z) і тривимірними параметрами шорсткості (наприклад, S_a , S_p і S_v), а також мікроструктурою.

S_a є середнім арифметичним значенням абсолютних відхилень висоти поверхні від середнього рівня (глобальної середньої лінії) в тривимірному просторі. Це узагальнена версія двовимірного параметра R_a , що враховує висоту по всій поверхні. Використовується для оцінки середньої висоти шорсткості поверхні і є корисним для аналізу загальної рівності поверхні.

S_p представляє собою квадратичне середнє відхилення висоти поверхні від середнього рівня. Це один з найпоширеніших тривимірних параметрів, на основі якого оцінюють загальну шорсткість поверхні, враховуючи величину відхилень. Даний параметр дає більш детальне уявлення про ступінь шорсткості, враховуючи не тільки середню висоту, але й величину варіацій висоти, що може бути важливим для оцінки функціональних властивостей поверхні.

S_v є загальною максимальною висоту між найвищими і найнижчими точками в межах певної області вимірювання. Чисельне значення цього параметру дозволяє оцінити найбільші нерівності на поверхні. S_z корисний для визначення найбільших

дефектів або нерівностей на поверхні, що може бути важливим для функціональних та конструктивних вимог деталей.

Фізико-механічні властивості поверхні включає дефектний шар (товщина пошкодження поверхні), структурні зміни, наприклад, у зоні теплового впливу та залишкові напруження біля поверхні.

Формули для розрахунку чисельних значень S_a , S_p та S_v наведено нижче:

$$S_a = \frac{1}{A} \int_A |z(x, y)| dA \quad (1.1)$$

Де: A — площа вимірювальної області;

$z(x, y)$ — висота поверхні в точці (x, y) .

$$S_p = \sqrt{\frac{1}{A} \int_A (z(x, y))^2 dA} \quad (1.2)$$

$$S_z = \max(z_{\max} - z_{\min}) \quad (1.3)$$

Де: z_{\max} — максимальна висота профілю;

z_{\min} — мінімальна висота профілю.

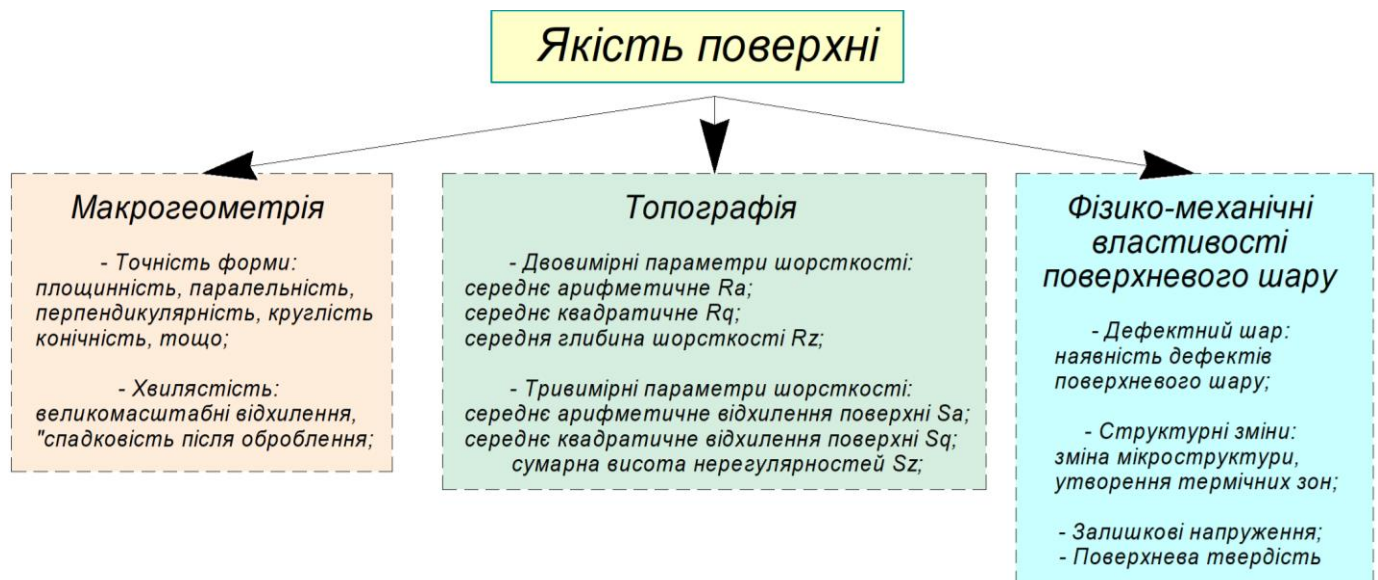


Рис. 1.1 Параметри, що визначають якість поверхні.

Якість поверхні суттєво визначає функціональні властивості оброблених матеріалів і деталей, включаючи їхній термін служби, трибологічні характеристики, знос, виділення тепла, рівень вібрацій, розвиток тріщин, умови змащення, стійкість до корозії та оптичні властивості. Наприклад, нерегулярності

поверхні, такі як пульсації, можуть значно впливати на рівень шуму, що створюється в передачах. Рельєф поверхні відіграє ключову роль у всіх цих аспектах, впливаючи на ефективність роботи механізмів і деталей. Цілісність поверхні є критично важливою для довговічності, оскільки дефекти, такі як тріщини або пошкодження, можуть прискорити процес зношування і призвести до передчасного виходу з ладу [15, 16].

Тому ефективна обробка поверхні є необхідною для досягнення задовільних функціональних характеристик і забезпечення надійності компонентів у різних умовах експлуатації.

1.2 Процес МАО та його особливості

Можливість проведення ефективного процесу МАО характеризується забезпеченням наступних основних умов оброблення [17-19] (рис. 1.2):

- Наявності притиску частинок магнітно-активного порошку (МАП) до оброблюваних поверхонь деталі, що зумовлено магнітними силами або динамічними факторами, тобто нормальна складова різання;
- Формування стабільного магнітно-абразивного інструменту (МАІ), тобто здатність до перемішування та відновлення форми частинок, відсутність розкидування порошку із оброблювальної зони і його рівномірне розподілення в робочому зазорі.
- Наявність відносного руху між частинками МАП та оброблюваними поверхнями, що характеризується тангенціальною складовою різання.
- Рівномірний рух частинок МАП відносно оброблюваної поверхні без утворення застійних і тіньових зон біля поверхні деталі або полюсного наконечника.

Ці умови є критично важливими для забезпечення ефективного процесу магнітно-активної обробки (МАО) і суттєво впливають на процеси та явища, що відбуваються під час МАО, а також на силові характеристики цього процесу. Тобто, для точного розуміння процесів і явищ, що виникають в результаті взаємодії між деталлю та МАІ, необхідно враховувати ці чотири ключові фактори. Для вивчення формування інструментального порошкового середовища, яке утворюється при

обробці реальних деталей з використанням МАІ, важливо дослідити процеси та явища, що виникають у МАІ під час обробки різних типів деталей.

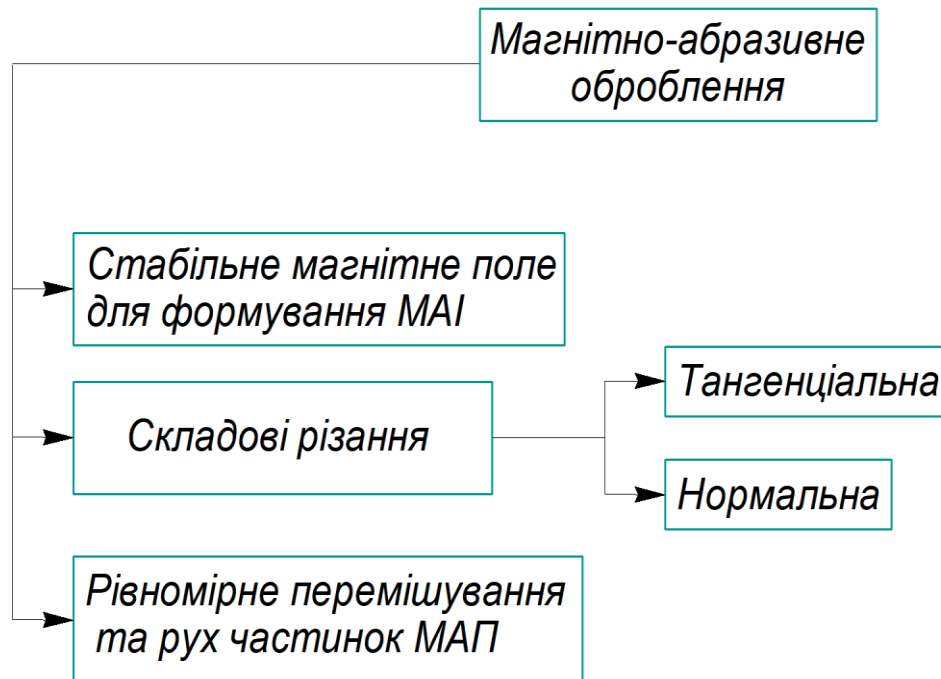


Рис. 1.2 Умови для забезпечення процесу МАО

1.3 Аналіз факторів, що безпосередньо впливають на процес формування МАІ

Для визначення параметрів якості поверхні, що формуються при магнітно-активній обробці (МАО) на деталі внаслідок впливу магнітно-абразивного інструменту (МАІ), а також для розуміння процесів і явищ, що супроводжують формування МАІ, необхідно детально вивчити сам процес МАО. Це включає аналіз формування інструментального феромагнітного абразивного середовища в умовах слабких магнітних полів та малих робочих зазорі, а також вплив численних факторів різної природи та походження (рис. 1.3).

Основними процесами, що відбуваються під час обробки, є механічні процеси. Зокрема, це механічне тертя між оброблюваною поверхнею та частинками порошку, яке призводить до знімання шару матеріалу, мікропластичне деформування поверхні. Не менш важливими є процеси всередині МАІ, де відбувається механічна взаємодія між частинками порошку. Для ефективної роботи

МАО важливо, щоб частинки порошку постійно змінювали своє положення у структурі МАІ, що сприяє оновленню різальних кромek зерен порошку і видаленню диспергованого матеріалу із зони різання. Це, в свою чергу, створює додаткові силові навантаження, які впливають на обробку. [20-24].

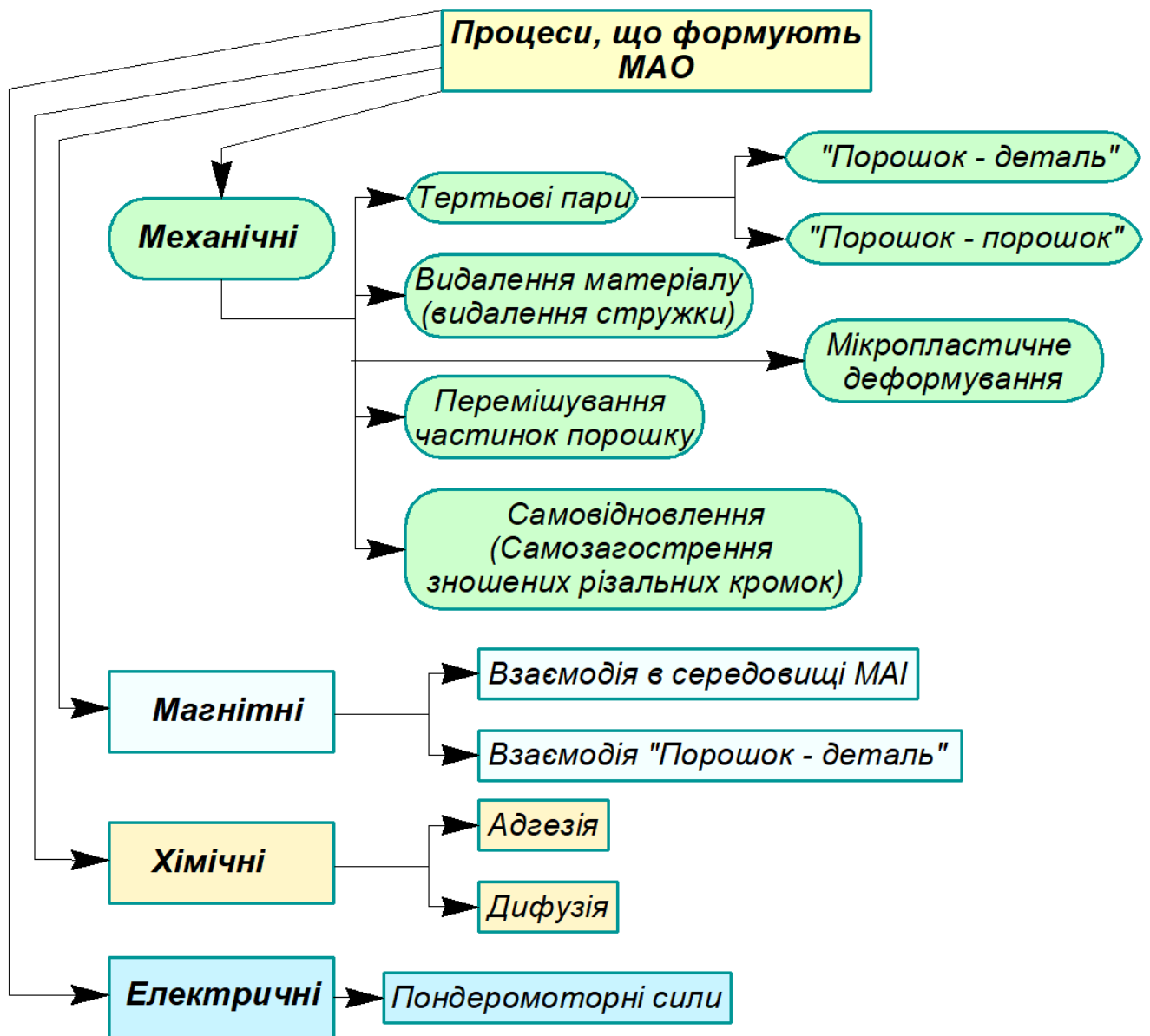


Рис. 1.3 Процеси які протікають при виконанні процесу МАО

Як і в будь-якому методі обробки різанням, процес МАО змінюється в залежності від вхідних технологічних параметрів. Проте, враховуючи специфіку МАО, ці параметри мають свої особливості. Основною з них є присутність магнітної складової, яка відіграє ключову роль у формуванні магнітно-активного

інструменту (MAI) і безпосередньо впливає на його характеристики. На рис. 1.4 представлена схема технологічних факторів, які безпосередньо впливають на процеси формування MAI.



Рис. 1.4. Фактори, що формують процес MAO та вихідну якість поверхні

Розглянемо більш детально одні із ключових факторів, що визначають процес магнітно-абразивного оброблення

1. Структура та пористість магнітного середовища мають значний вплив на ефективність магнітно-абразивного оброблення. Це стосується як фізичних, так і магнітних характеристик матеріалів, що використовуються для таких процесів.

Структура магнітного середовища (наприклад, тип матеріалу, розмір часток, їх орієнтація) визначає, яким чином елементи інструментального середовища взаємодіють у магнітному полі як між собою, так і з поверхнею деталі, що оброблюється. Вона може включати:

- 1) Розмір та форма часток: Магнітні частки, як правило, взаємодіють з магнітними полями, і їх розмір може змінювати спосіб, яким поле проникає в матеріал. У матеріалах з дрібними частками поле може проникати глибше, що покращує ефективність обробки.
- 2) Вміст дефектів, фазових переходів та інших мікроскопічних неоднорідностей може суттєво впливають на взаємодію матеріалів у магнітному полі.
2. Пористість магнітного середовища впливає на його здатність до взаємодії між складовими МАІ та оброблюваними поверхнями. Пористість, в свою чергу, змінює такі аспекти:
 - а. Проникність матеріалу для магнітного поля: Матеріали з високою пористістю зазвичай мають нижчу магнітну проникність, що може зменшити ефективність МАО, оскільки поле буде менше проникати через пори. Це може призвести до того, що деякі частини середовища не будуть достатньо активовані магнітним полем.
 - б. Магнітні властивості пор: Пори можуть бути заповнені іншими матеріалами (наприклад, рідинами або газами), що змінює взаємодію магнітного поля з матеріалом. В залежності від цього, магнітна індукція в матеріалі може змінюватися.
 - с. Контакт між частками: У матеріалах з високою пористістю між частками може бути менше контактних взаємодій, що може погіршити передачу магнітного впливу між МАІ та оброблюваною деталлю.

При МАО, де магнітне поле використовують для формування МАІ та оброблення поверхонь заготовки, вплив структури та пористості на матеріал може зводитися до таких факторів:

- 1) Змінна чутливість до магнітних полів: У залежності від структури матеріалу його чутливість до зовнішніх магнітних полів може змінюватися. Це означає, що матеріал з високою пористістю або структурними дефектами може бути менш ефективно оброблений.

- 2) Теплові ефекти: Якщо магнітне поле викликає теплові зміни в матеріалі, то структура може впливати на теплопровідність, що, у свою чергу, може змінити результати оброблення.

3. Вплив форми абразивних часток

Форма абразивних часток може значно змінювати механізм і ефективність їх взаємодії з оброблюваною поверхнею [25-31].

- 1) МАП з гострими кутами або загостреними краями здатні ефективніше врізатися в поверхню, що підвищує зносостійкість і швидкість обробки. Вони можуть створювати глибші подряпини і ефективніше знімати матеріал з оброблюваної поверхні.
- 2) Округлі частинки з більш округлими краями чи без чітких граней, навпаки, менш ефективні в знятті матеріалу. Вони можуть діяти більш м'яко, що забезпечує формування більш гладкої обробленої поверхні, але знижує ефективність процесу.
- 3) Неоднорідні частки: Абразиви з неправильними формами, що мають комбінацію гострих і округлих частин, можуть викликати непередбачувану поведінку, знижуючи стабільність процесу, однак можуть бути корисними для досягнення бажаних властивостей на поверхні.

4. Вплив розміру абразивних часток

Розмір часток також є важливим чинником, який впливає на характер процесу МАО.

- 1) Малі частки забезпечують більш рівномірне та м'яке зняття матеріалу, що призводить до отримання гладкої і високоточної обробленої поверхні. Частки здатні створювати менші механічні навантаження на оброблювану поверхню, тому цей розмір абразиву може бути корисним для тонких або делікатних матеріалів. Однак малий розмір часток може знижувати швидкість зняття матеріалу, оскільки кожна частка взаємодіє з поверхнею менш інтенсивно.
- 2) Великі частки абразиву можуть знімати більше матеріалу за одиницю часу, що прискорює оброблення, але й збільшує механічне навантаження на поверхню. Це може призвести до більш грубих подряпин та нерівностей.

Вони можуть бути корисними для обробки більш твердих матеріалів або для швидкого зняття великої кількості матеріалу. Проте великі частки можуть призвести до більшої вірогідності пошкодження поверхні або меншої точності обробки.

5. Взаємодія між розміром часток і формою

Комбінація форми та розміру часток є важливою для досягнення бажаних результатів у процесі МАО. Дрібний гострий МАП може забезпечити високу точність та якість поверхні, але з низькою швидкістю обробки. МАП сформований із великих гострих часток можуть прискорити процес зняття матеріалу, але призвести до більш грубих результатів. Дрібні округлі частинки можуть бути корисні для більш м'якої обробки, що дозволяє досягти гладких поверхонь без значного зношування інструменту. Великі округлі частки менш ефективні в знятті матеріалу, але вони можуть бути корисними для обробки на більш м'яких матеріалах.

6. Вплив на температуру та ерозію

Абразивні частки під час МАО можуть також впливати на температурні характеристики обробки - малі частки під час ударів та тертя можуть створювати вищі температури на оброблюваній поверхні, що може призвести до перегріву та ерозії матеріалу. Великі частки знижують інтенсивність локальних температурних змін, але можуть викликати механічні пошкодження через великі сили удару.

Підсумок:

Форма абразивних часток впливає на ефективність зняття матеріалу та тип обробленої поверхні (гладка чи з великими подряпинами).

Розмір абразивних часток безпосередньо корелює з швидкістю процесу та точністю обробки: менші частки створюють менші пошкодження, але знижують швидкість, а великі частки прискорюють процес, але можуть призвести до більш грубої поверхні. Залежно від конкретних завдань, вибір розміру і форми абразиву може суттєво змінити ефективність і результати МАО. Врахування цих факторів дозволяє оптимізувати процеси МАО для досягнення бажаних результатів.

1.4 Огляд застосування магнітно-абразивного оброблення та особливості формування МАІ

Дослідження наведені авторами [32] демонструють процес МАО деталей вільної форми із застосуванням методу моделювання Тагучі при постановці експерименту. Авторами проведено серію експериментальних досліджень із застосуванням обладнання на базі електромагнітної однополюсної установки та використанням суміші МАП із феромагнітної складової та оксиду алюмінію. Результатами оброблення, наведених на рис. 1.5 доведено, що чим менший робочий зазор між магнітним полюсним наконечником і оброблюваною поверхнею заготовки, тим вище значення напруженості магнітного поля. З опису результатів оброблення виявлено, що робочий зазор має найбільший вплив на якість обробки. Відповідно, раціонально обраний робочий зазор (в даному випадку 2,5 мм) може зменшити шорсткість та підвищити якісні параметри поверхневого шару.

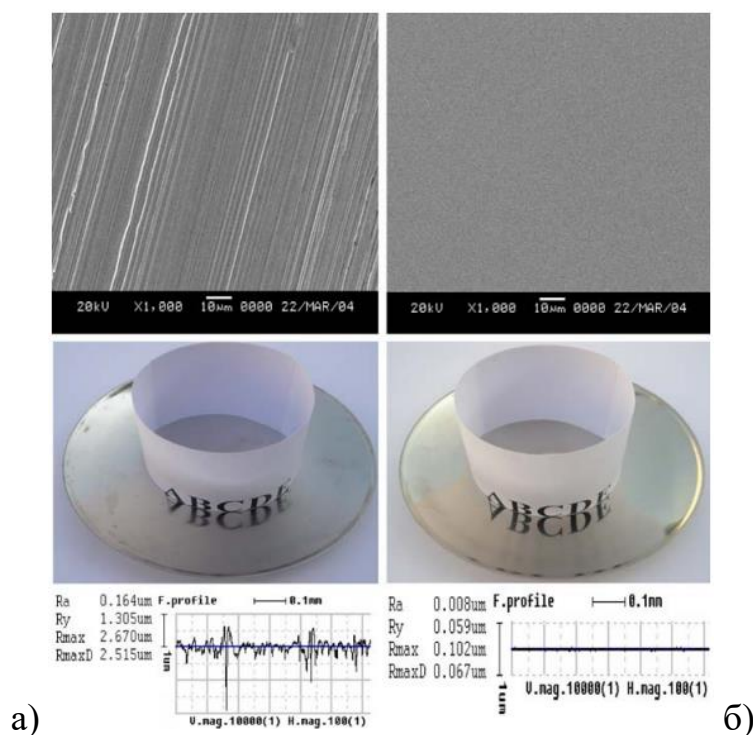


Рис. 1.5 а) – шорсткість поверхні до оброблення, $R_a = 2,670$ мкм;

б) – шорсткість поверхні після МАО, $R_a = 0,102$ мкм

Окрім опису впливу величини робочого зазору дослідниками приведені аргументи по варіації робочої подачі інструменту, а саме, зменшення швидкості подачі магнітного полюса, призводить до збільшення кількості магнітно-

абразивних часток порошку, що буде проходити через робочу зону одночасно, таким чином покращуючи обробку поверхні. При збільшенні значення подачі ефект буде протилежним, так як, швидкість знімання матеріалу буде відносно зменшена. Тому для досягнення оптимальної якості поверхні рекомендовано обирати нижчу швидкість подачі, яка варіюється в межах 10 мм/хв. Також надано рекомендації щодо магнітно-абразивних часточок, а саме – те, що для абразивів не має характеристики «більший-кращий», оскільки додатковий об'єм порошку не зможе позитивно вплинути на процес вцілому, поліпшити циркуляцію МАП в робочій зоні та призводить до зменшення ефективності процесу, хоча в певній мірі це можливо застосувати при чорновому обробленні.

В [33] проведено експериментальне дослідження по поліпшенню шорсткості поверхні нержавіючої сталі 420 з використанням магнітно-абразивного методу в якості фінішної операції. Були вивчені чотири незалежні робочі параметри (робочий зазор, струм котушки, швидкість подачі та хід столу) та представлено їх вплив на процес MAO. Розроблено і реалізовано установку для оброблення площин, схематичне зображення установки представлено на рис. 1.6.

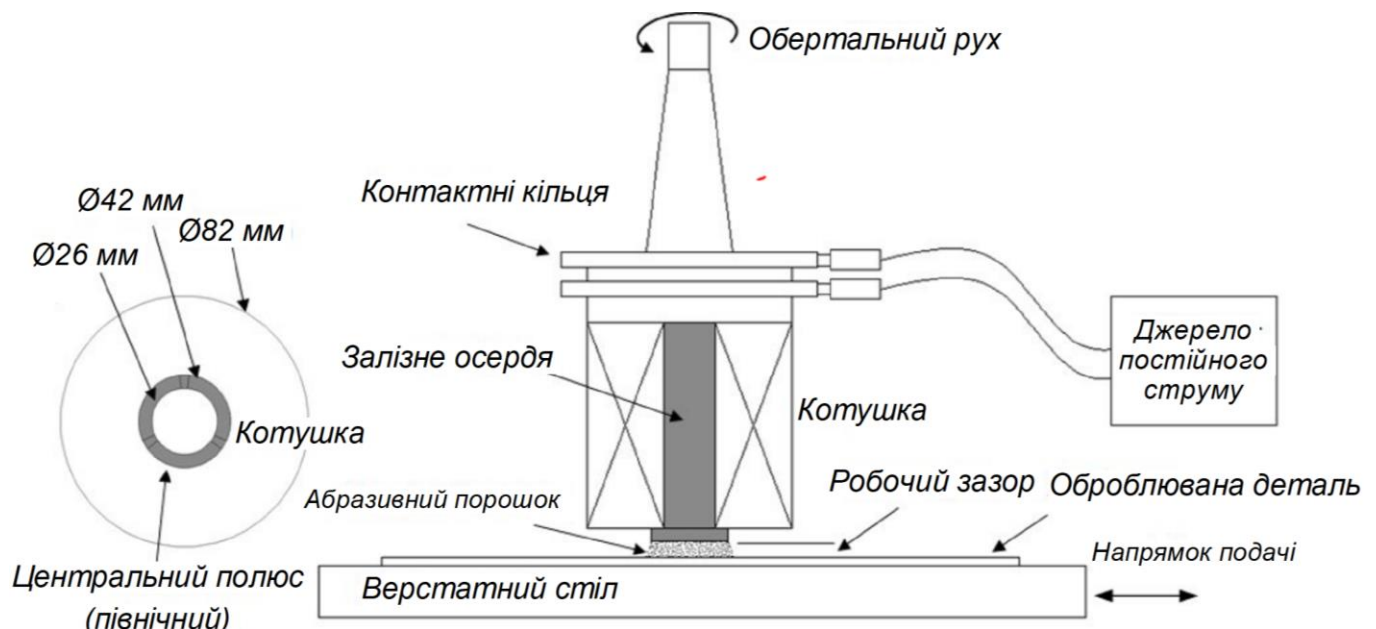


Рис. 1.6 Магнітно-абразивна установка. 1 – електромагнітний індуктор; 2 – заготовка; 3 – вертикально фрезерний верстат; 4 – рухомий стіл; 5 – джерело живлення; 6 – блок керування швидкістю стола.

В якості МАП було застосовано суміш утворену із 33% заліза та 67% кварцу (розмір зерна 250 мкм). Мастило типу SAE 20W використовувалось як пластична зв'язка – сполучна речовина для додаткового утримання та перемішування порошку. Для постановки експериментів та прийняття оптимальних значень вхідних параметрів було використано метод Тагучі. В якості заготовки використовували тонкі пластини із нержавіючої мартенситної сталі 420, що має феромагнітні властивості. Початкове значення шорсткості – $R_a = 0,316$ мкм, кінцеве – 0,124 мкм. Відповідні зображення вихідної та обробленої поверхні представлено на рис. 1.7.

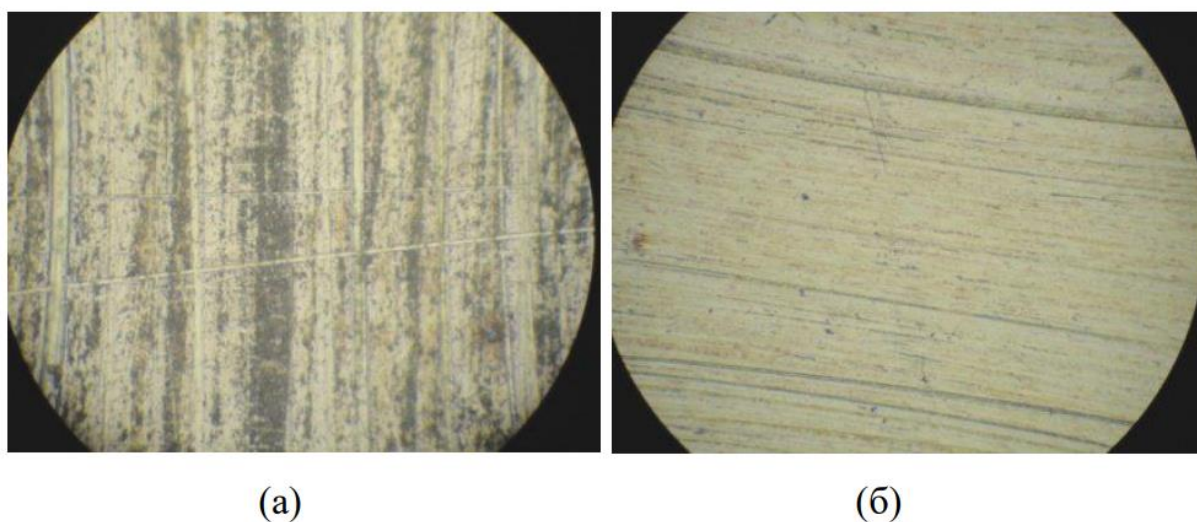


Рис. 1.7 Оптичне сканування мікроскопом (x1250): (а) – до МАО, (б) – після МАО

Досліджено та наведено емпіричне рівняння, що представляє зв'язок між шорсткістю поверхні та робочими параметрами, наведено чисельні дані щодо параметрів обробки, але відсутні дослідження по обробці пара- та діамагнітних матеріалів.

В [34] представлено результати досліджень з серії із 10 ітерацій із змінними параметрами - такими, як жорсткість магнітного поля (робочий струм), робочий зазор та склад магнітно-абразивної суміші. Проаналізувавши вищезазначену роботу, можна зробити висновки, що впливати на реалізацію процесу фінішної обробки магнітним абразивом можна за шляхом варіюванням змінними параметрами процесу, якими є струм (щільність магнітного потоку), зазор для

оброблення та розмір абразивного зерна. Варто також відзначити, що як і в попередніх роботах оптимальна величина параметру робочого зазору коливається в межах від 2,0 до 3,0 мм, в залежності від розміру часток.

Експериментальні дослідження із використанням обладнання для MAO на основі електромагніту (рис. 1.8) наведені в [35] доводять, що процес MAO може використовуватись не тільки як процес для видалення певних об'ємів матеріалу або для підвищення параметрів шорсткості оброблюваних поверхонь, а також як метод по поліпшенню якісних характеристик поверхневого шару деталей.

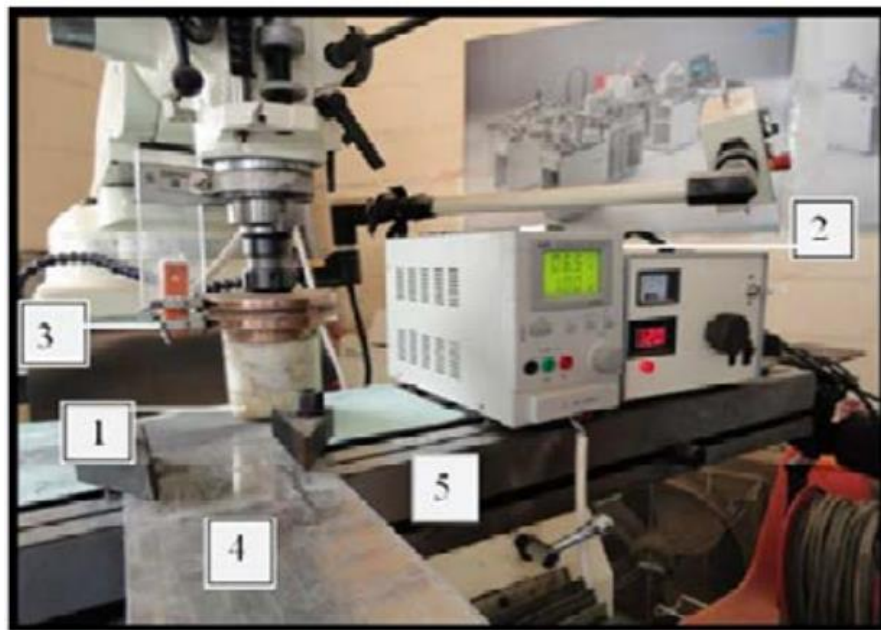


Рис. 1.8 Зображення установки для MAO: 1- індуктор; 2 – блок живлення; 3 – кільця електромагніту; 4 – заготовка; 5 – робочий стіл

Наведені експериментальні дослідження дають змогу зробити наступні висновки:

- 1) Процес MAO має вплив не тільки на шорсткість поверхні, а й на властивості поверхні і поверхневий шар виробів, такі як, наприклад, твердість. Показано, що зміна твердості може мати як додатні значення так і від'ємні, що показано із результатів експерименту. Чисельні значення зміни твердості становили до 20 одиниць твердості по Вікерсу у порівнянні із початковими 150 для нержавіючої сталі 321;
- 2) Вкотре розглянуто позитивний вплив збільшення часу контакту МАІ із оброблюваною поверхнею, що збільшує об'єм МАП, що бере участь у

- процесі оброблення. Доведено раціональність вибору величини робочого зазору в межах до 3-х мм - в умовах оброблення у малих магнітних зазорах;
- 3) Оглянуто вплив об'єму МАП у робочому зазорі на зміну параметру твердості, з результатів можна зробити висновок, що збільшення кількості магнітно-абразивних часток веде до збільшення поверхневої твердості, але має негативний вплив на якість оброблення;
- 4) Показано вплив форми торцевих поверхонь магнітного полюсного наконечника, зображених на рис. 1.9, на процес MAO. Авторами відмічено підвищення ефективності протікання процесу при виконанні на поверхні індуктора заглиблень або виступів, в даному випадку 6 канавок.



Рис. 1.9 Зображення конусного (зліва) та фігурного (праворуч) полюсних наконечників

Дослідниками в [36] представлено процес MAO із використанням установки в основі якої електромагнітні котушки змонтовані на електродвигуні, а в якості робочого середовища використовується контейнер в який поміщаються деталі із парамагнітних матеріалів таких як, алюмінієвий AA-6061 та бронзовий C8 5800 сплави, а в якості магнітно-абразивного порошку виступають дрібнозерниста суміш із голок розміром 0,1 мм в діаметрі та 1,5 мм в довжину, матеріалом яких є нержавіюча сталь AISI 420 (C: 0.15%, Si: 1.00%, Mn: 1.00%, P: 0.04%, S: 0.03%, and Cr: 14.00%).

Варто відмітити, що установку, наведену на рис. 1.9, можна представити у вигляді багатополюсного МАІ із постійних магнітів, що при обертанні контейнеру із

робочим середовищем буде сприяти одній із ключових складових процесу МАО – рівномірному та постійному перемішуванню МАП.

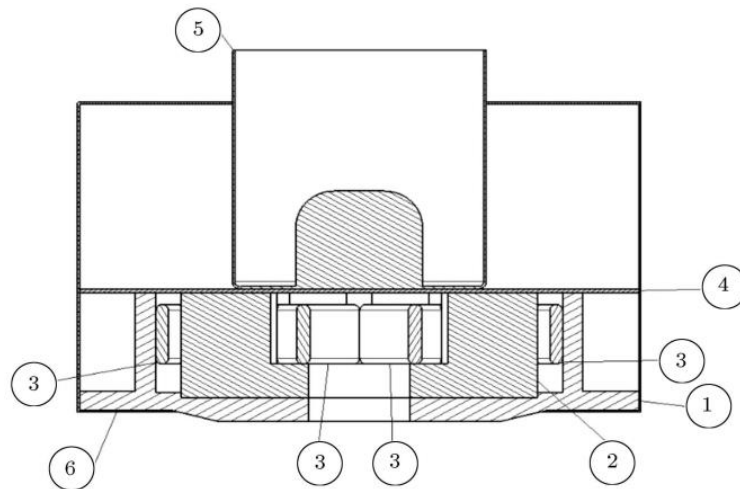


Рис. 1.9 Зображення електромагнітної установки: 1 - Магнітний дисковий корпус; 2 – осердя котушки; 3 – котушки; 4 – парамагнітна пластина; 5 – контейнер із робочим середовищем; 6 – корпус

У дослідженні розглянуто вплив зміни швидкості обертання МАІ, що в даному випадку напряду залежить від частоти струму та виокремили граничні умови при яких відбувається процес оброблення – це частота від 5 до 54 Гц, після перевищення якого процес припиняється за рахунок надмірного впливу відцентрових сил на МАП. Доведено, що із збільшення розміру абразивних часток веде до погіршення параметрів поверхні. Розглянуто вплив робочого зазору між контейнером та електромагнітом, у даному випадку самим оптимальним значенням є 1,6 мм, так як зменшення зазору веде до заклинювання МАП, а збільшення веде до послаблення впливу магнітного поля на абразив.

В [37] розглянуто процес МАО заснованого на використанні змінного магнітного поля, яке викликає коливання кластерів МАП на вістрі інструменту, даний вплив сприяє перетіканню абразивних часток по усіх поверхнях, циркулюючи та оновлюючись для забезпечення стабільності шліфувального інструменту та постійне оновлення різальних кромek. В якості заготовок виступають пластини (80x90x1) із SUS304, (80x90x1) POM (поліформальдегід), латуні С2680. Принципову схему обробки, експериментальну установку із

використанням низькочастотного змінного магнітного поля, вихідні та оброблені поверхні представлено на рис. 10 та 11 відповідно.

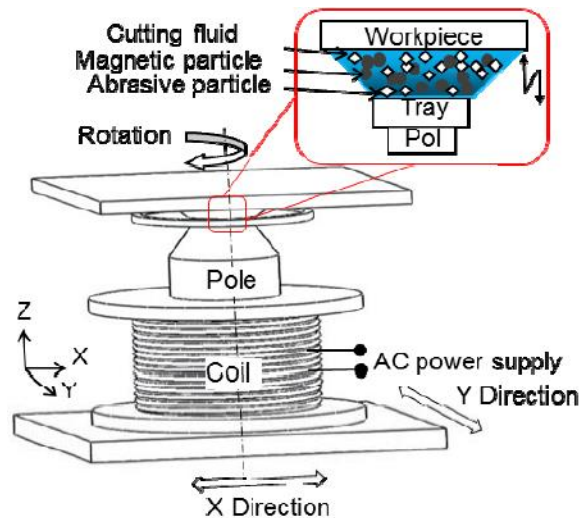


Рис. 1.10 Принципова схема обробки

На основі аналізу механізму, можна відзначити збільшення видалення матеріалу при використанні МАО на основі змінного магнітного поля, приблизно в 2,05 рази, ніж у магнітного поля, що створюється постійними магнітами.

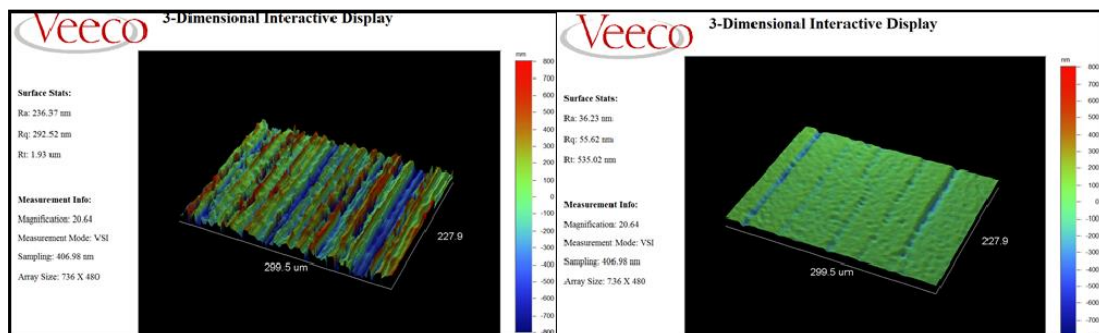


Рис. 1.11 3D зображення поверхонь до та після полірування

Експериментальні результати показали, що низькочастотне перемінне магнітне поле може викликати коливальну обробну силу, яка більша, інтенсифікує процес МАО та дає кращі результати оброблення, ніж аналогічний процес із використанням сталого магнітного поля. Змодельовано перемінну магнітну силу як періодичну симетричну хвилю трикутника і виконано перетворення Фур'є. Розглянуто та досліджено механізм збільшення глибини полірування та видалення матеріалу в процесі МАО з використанням поперемінного магнітного поля.

Цими ж дослідниками виконані роботи [38] по покращенню МАО із застосуванням щоб підвищити ефективність обробки традиційного процесу плоскої магнітно-

абразивної обробки (MAF), було запропоновано MAF у поєднанні з електролітичним процесом (EMAF). Експериментальні результати показують, що існують раціональні експериментальні умови, і найкращі результати були отримані при використанні електролітичного порошку заліза у поєднанні із оригінальною конструкцією індуктора наведеного на рис. 1.12 (середній діаметр часток 330 мкм).

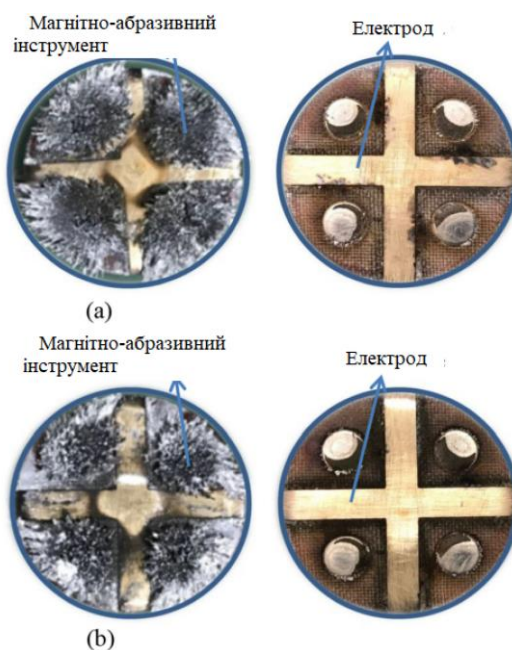


Рис. 1.12 МАІ типу «щітка» сформований на торці: (а) – Дозування МАП 1,0 г; (б) – Дозування МАП 0,6 г.

Було з'ясовано, що фактори, які впливають на стабільність обробки та якість поверхні, пов'язані не лише з розміром частинок магнітних частинок, але також мають великий зв'язок із кількістю магнітних частинок. Якщо кількість магнітних частинок занадто велика, це спричинить нестабільний струм оброблення та навіть коротке замикання під час перебігу процесу ЕМАФ. У той же час, протікання такого процесу буде супроводжуватись нестабільними електролітичними реакціями, що буде мати вплив на ефективність та якість оброблення. Якщо розмір магнітних частинок буде занадто малим, абразивний вплив тиск буде недостатнім, крім того, під час ЕМАФ також відбуваються електролітичні реакції між магнітними частинками та електродом, в результаті чого магнітні частинки руйнуються в процесі, а розмір частинок стає меншим. Відмічено недолік процесу ЕМАФ, при використанні великих струмів спостерігається генерація тепла. Це призводить до

перевитрати магнітних частинок, а тепло, що поглинається деталлю та електродом може зазнавати термічного впливу. У цьому дослідженні, коли кількість залізного порошку 330 мкм становить 0,6 г, струм обробки ЕМАФ є найбільш стабільним, ефективність обробки є найвищою, а шорсткість поверхні заготовки покращилася з Ra 329 мкм до Ra 14 мкм.

У експериментальній роботі [39] була розроблена та успішно використана установка МАО для чистової обробки плоских поверхонь деталей, матеріалом яких є сталь 17-4РН. Проводились дослідження впливу різних вхідних параметрів процесу, а саме напруги, струму живлення, робочого зазору, швидкості обертання та кількості абразивних частинок у складі МАІ на робочі характеристики та морфологію поверхні. Висновки за результатами експериментального аналізу такі:

- 1) Щільність магнітного потоку зменшується зі збільшенням робочого зазору, це зменшує жорсткість МАІ та має прямий вплив на продуктивність видалення матеріалу. Однак щільність магнітного поля спочатку зростає з радіальною відстанню до окружності сердечника, а потім починає зменшуватися.
- 2) Максимальна відсоткова зміна шорсткості поверхні на рівні 90,37% спостерігалася при робочому зазорі в 1,5 мм та швидкості обертання 600 об/хв. Розмір абразивних часток при цьому становив 600 мкм.
- 3) Швидкість видалення матеріалу зростала зі збільшенням напруги, струму та швидкості обертання, але спостерігалось її зменшення зі збільшенням робочого зазору та збільшенням розміру абразиву.
- 4) Порівнюючи морфологію поверхні заготовки до та після МАО, було виявлено, що МАО усуває нерівності поверхні, такі як тріщини, ямки, сліди фрезерування та подряпини що призводить до зменшення шорсткості поверхні, що призводить до більш гладкої та однорідної текстури поверхні.

Розглянуті вище дослідження виконані із використанням установок для проведення процесу МАО на основі електромагнітів. Процес магнітно-абразивної обробки (МАО) із використанням електромагнітів має кілька

недоліків порівняно з МАО на постійних магнітах, які можуть впливати на ефективність і якість обробки:

1. Енергоспоживання: Електромагніти вимагають постійного живлення електричним струмом для підтримки магнітного поля. Це веде до додаткових витрат енергії в процесі обробки, в той час як постійні магніти забезпечують магнітне поле без потреби в зовнішньому живленні.
2. Контроль магнітного поля: У випадку з електромагнітами контроль за інтенсивністю та геометрією магнітного поля може бути складнішим, особливо при змінних робочих умовах. На постійних магнітах магнітне поле стабільне, і його характеристики не змінюються в залежності від змінних параметрів живлення або температури.
3. Температурні ефекти: Електромагніти можуть нагріватися в процесі роботи через витрати енергії, що може вплинути на їхні магнітні властивості. Постійні магніти мають більш стабільні характеристики в умовах температурних коливань, хоча вони також можуть втрачати частину своїх магнітних властивостей при дуже високих температурах.
4. Комплексність обладнання: Використання електромагнітів потребує наявності додаткових елементів, таких як джерела живлення, трансформатори, регулятори струму, що збільшує вартість і складність обладнання. Постійні магніти, з іншого боку, є більш простими і надійними в експлуатації, оскільки не потребують таких додаткових компонентів.
5. Точність і стійкість до зовнішніх факторів: Електромагнітне поле може бути чутливим до коливань напруги в мережі або інших електричних коливань, що може призвести до незначних змін в інтенсивності магнітного поля, а отже, в ефективності обробки. Постійні магніти менше піддаються таким впливам і забезпечують більш стабільний процес.

В результаті, хоча використання електромагнітів може бути корисним в певних випадках, особливо коли потрібна можливість регулювання магнітного поля, для більшості типових завдань обробки на постійних магнітах є більш ефективним і економічним рішенням.

Розглянемо роботи із використанням постійних магнітів. В роботі [40] у дослідженнях магнітно-абразивного оброблення внутрішніх отворів деталей із твердого сплаву із використанням верстатного обладнання (рис. 1.13) було отримано експериментальні дані, що дозволили визначити оптимальні значення зазору між інструментом і заготовкою, а також швидкостей руху інструмента та заготовки під час обробки. Автором розглянуто зміну параметрів зазору, за інших незмінних умов обробки, та доведено, що зменшення значення величини R_a , що встановилася після оброблення до МАО, може бути змінена впливом жорсткості «магнітної щітки» в місці її впливу на оброблюваний матеріал.

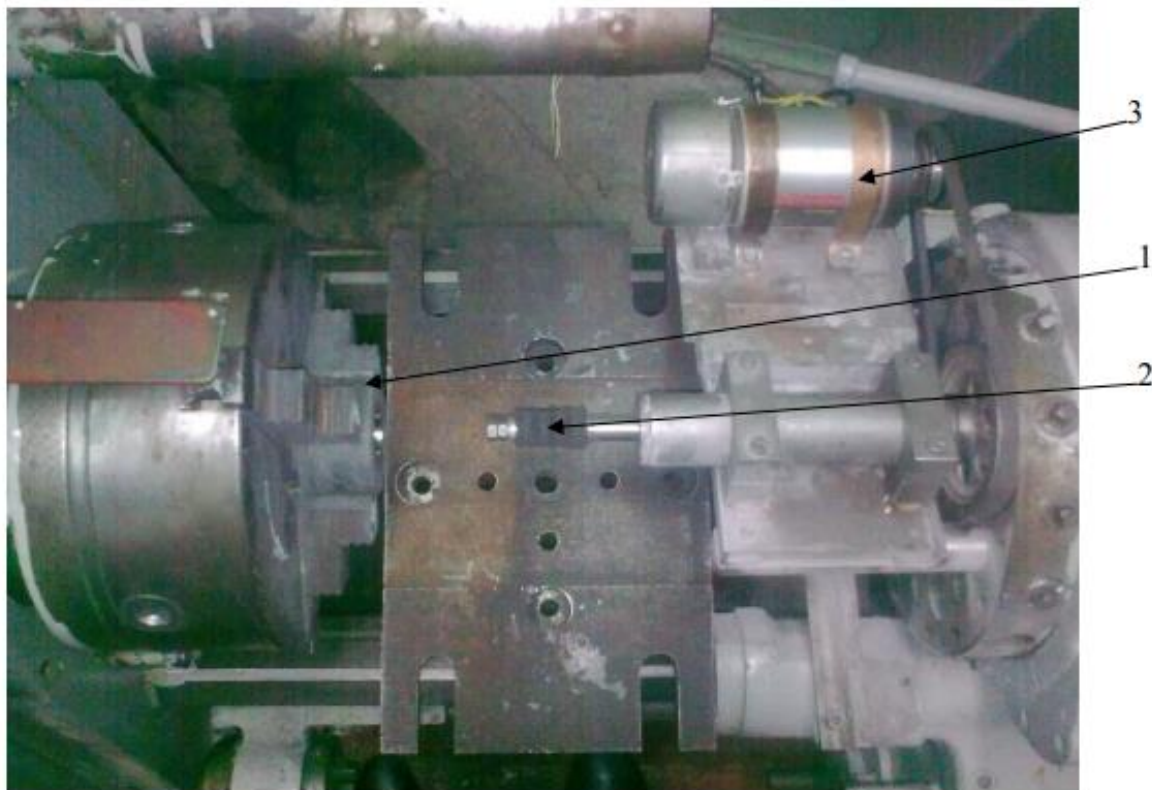


Рис. 1.13 Вид зверху на експериментальну установку для МАО внутрішніх поверхонь на базі токарно-револьверного верстата 1341: 1- заготовка; 2 - оправка з магнітними кільцями; 3 – привід

Варто відмітити застосування в якості МАП суміші залізно-абразивного порошку із синтетичним алмазом у вигляді абразивних включень, що позитивно впливає на видалення матеріалу та зниження рівня шорсткості. Також доведено, що суттєвий вплив на якість поверхні після оброблення має початкова шорсткість оброблюваної поверхні, даний вплив можна описати лінійною залежністю, при

якій меншому значенню вхідної шорсткості буде відповідати менше значення після МАО.

В дослідженні [41] розглянуто це процес обробки поверхонь з поєднанням хімічних і механічних сил. Це гібрид хімічного травлення та вільного абразивного полірування із використанням магнітного поля. У даного методу абразивна та корозійна хімічна суспензія використовується в поєднанні з полірувальним індуктором зображеним на рис. 1.14. Суспензія наноситься на поверхню деталі, щоб на поверхні утворився більш м'який оксидний шар. Будучи м'якшим, цей оксидний шар набагато легше видалити порівняно з основним матеріалом, який не піддавався хімічному впливу.



Рис. 1.14 Феромагнітна абразивна щітка

В якості зразків було обрано пластинки із вольфраму (10 мм x 10 мм x 1 мм) твердістю 440 Нv та щільністю 17,5 г/см³. Даний матеріал має феромагнітні властивості, завдяки чому було створено високу фрикційну взаємодію МАП та оброблюваної поверхні за рахунок взаємного притягування абразиву до зразка, що сприяє ефективнішому проходженню оброблення. У якості абразиву використовували порошок оксиду алюмінію розміром 1200 мкм. Параметри, що

були використані для отримання поверхонь наведених на рис. 1.15 наведені в таблиці 1.1

Таблиця 1.1 – Параметри проведеного експерименту

№ рисунка	Обертів за хвилину, об/хв	Робочий зазор, мм	Концентрація H ₂ O ₂ , (%)	Концентрація абразиву, (%)	% ΔRa
1.15 (b)	100	1	5	30	49,64
1.15 (c)	150	3	5	20	58,44
1.15 (d)	150	1	7	20	79,52

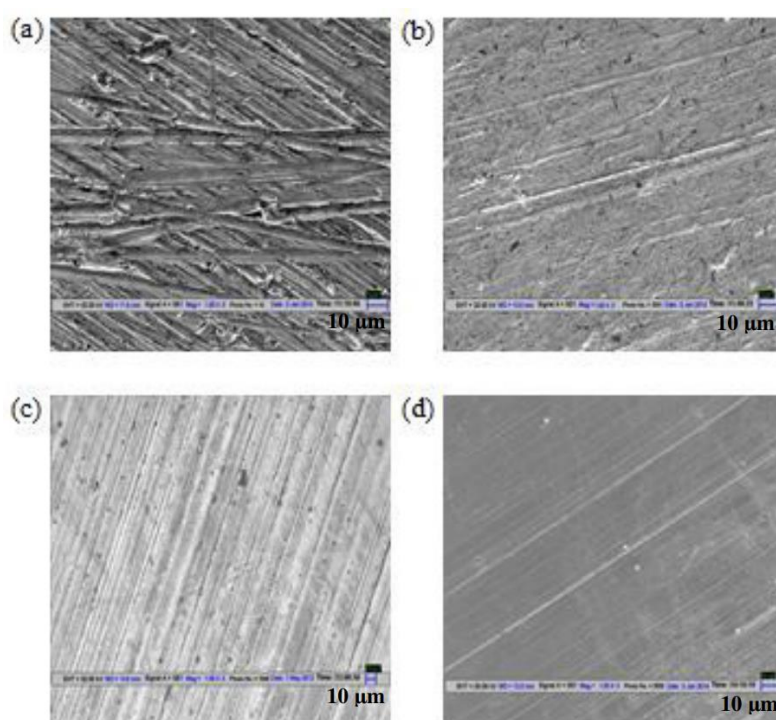


Рис. 1.15 Зображення поверхонь: (a) – заготовки; (b,c,d) зразка після його оброблення за різних умов оброблення

Доведено, що використання поєднання хімічного окислення та магнітних сил сприяє утворенню кращої якості поверхні з мінімальними поверхневими дефектами. Помічено, що під час оброблення на відсоткову зміну якості поверхні найбільше впливає швидкість обертання МАІ (37,71%), потім відсоток маси абразиву (27,74%), робочий зазор (16,12%) та концентрація розчину H₂O₂ (13,75%). За оптимальних умов процес оброблення поверхні покращується на 79,52%. Морфологія поверхні показує, що максимальна висота від виступів до впадини для

обробленого зразка становить приблизно $1/5$ від того самого для необробленого зразка.

У [42] описано процес дослідження та синтезу установки для МАО профілю кільцевої канавки для закладання гумового ущільнюючого кільця. Традиційні методи фінішної обробки важко застосувати на нижній та бічній поверхнях через особливу структуру канавки ущільнювального кільця, а ефективність оброблення із застосуванням таких методів оброблення - низька. Для вирішення цих проблем було створено процес магнітно-абразивної обробки (МАО). Як нетрадиційний точний процес обробки, МАО має багато переваг. Використовуючи магнітне поле згенероване постійним магнітом, магнітні абразивні частинки зв'язуються та вибудовуються у вигляді гнучкої магнітно-абразивної щітки для оброблення заготовки. Зовнішня поверхня канавки ущільнювального кільця може синхронно поліруватися в механізмі МАО. Отже, три типи потоків МАП з магнітними полюсами, що розташовані під кутом 45° , 90° та 180° були змодельовані та порівняні за допомогою програмного забезпечення ANSYS. Розташування полюсів магніту та щільність магнітного потоку додатково апробовано за допомогою вимірювального обладнання. Схема обробки (рис. 1.16) та синхронний пристрій МАО (рис. 1.17) було розроблено на основі результатів моделювання.

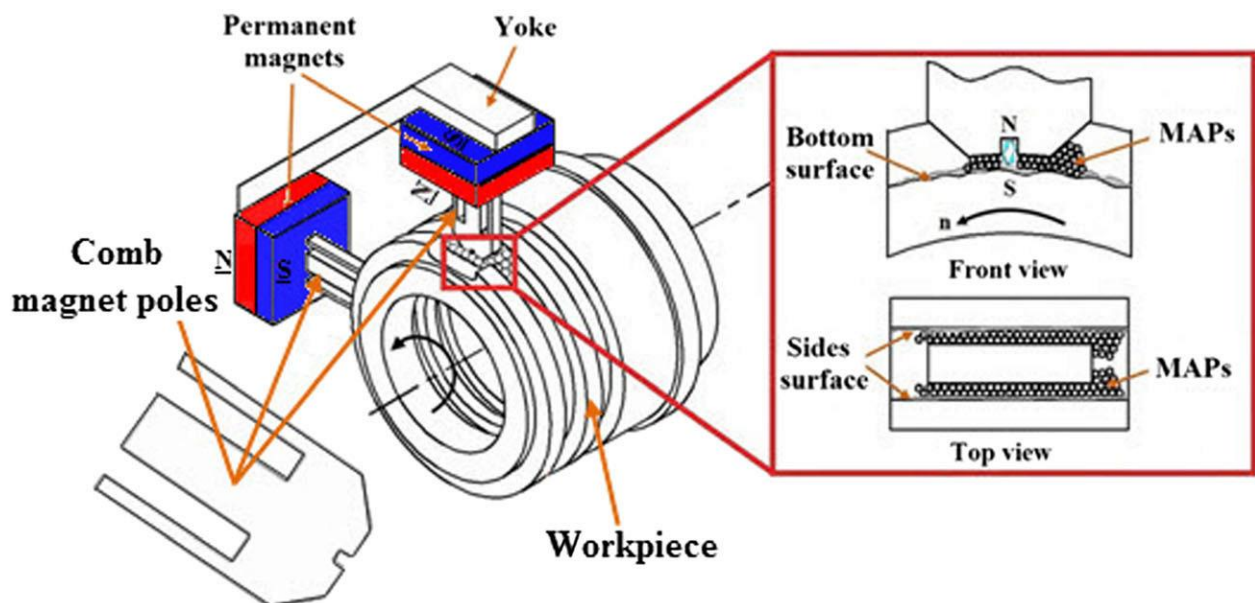


Рис. 1.16 Принципова схема обробки кільцевої канавки

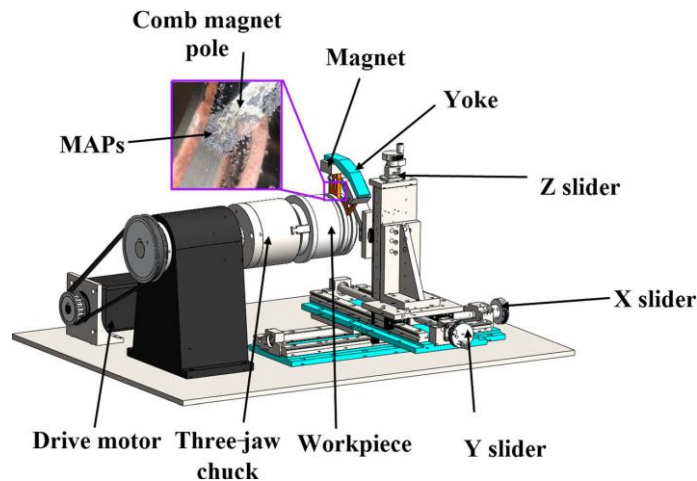


Рис. 1.17 Зовнішній вигляд установки для оброблення кільцевої канавки

В якості об'єкту дослідження виступають в'язкість мастила (відсоток між мастилом і водою), швидкість обертання шпинделя, зазор між полюсами магніту і дном кільцевої канавки (зазор 1), а також зазор між полюсами магніту і сторонами кільцевої канавки (зазор 2). Крім того, експериментальні дані були зібрані з використанням ортогональної експериментальної конструкції, а експериментальні дані щодо параметрів процесу були проаналізовані для визначення оптимальних умов. Було проаналізовано поверхню кільцевої канавки і було виявлено оптимальні умови та встановлено, що шорсткість поверхні від початкового R_a 4,3 мкм зменшилася до R_a 0,6 мкм, а тривимірна топографія поверхні (рис. 1.18) стала більш рівномірною та згладженою

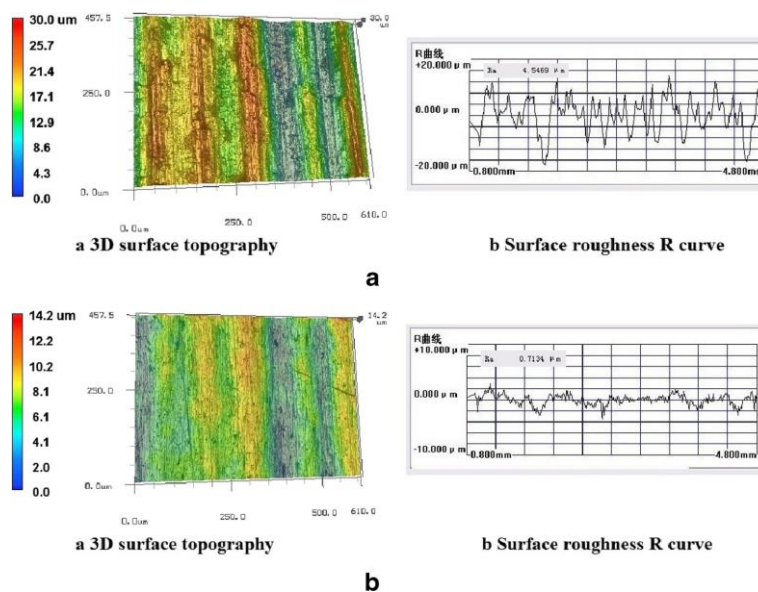


Рис. 1.18 3D зображення та профілограма поверхневого шару: а) – до обробки; б) – після оброблення

Результати показали, що МАО може забезпечити високоефективний спосіб отримання високої якості поверхонь плоскої, складної форм, а також як зовнішніх так і внутрішніх поверхонь.

Метою дослідженнях проведених в [43] є дослідження впливу абразивів карбиду бору на оброблення поверхні та швидкість зняття матеріалу плоскої латунної пластини за допомогою магнітно-абразивного процесу фінішної оброблення. У цій дослідницькій роботі розглядаються чотири вхідні параметри: швидкість обертання, кількість МАП, розмір абразивних часток та час оброблення. Для дослідження впливу вхідних факторів на шорсткість поверхні та швидкість видалення матеріалу було використано повнофакторний експериментальний метод планування. Дисперсійний аналіз (ANOVA) досліджували за допомогою статистичного програмного забезпечення, щоб знайти оптимальні умови для кращої шорсткості поверхні та швидкості видалення матеріалу. Регресійні моделі були розроблені за допомогою статистичного програмного забезпечення MINITAB-17 як для шорсткості поверхні, так і для швидкості видалення матеріалу. Експериментальні результати показали, що швидкість обертання є найважливішим параметром зміни шорсткості поверхні та часу оброблення для зміни величини видалення матеріалу. Мінімальна шорсткість поверхні (R_a) становила 0,061 мкм, а максимальна швидкість видалення матеріалу – 3 мг/хв.

Деякі галузі промисловості, такі як лазерна, аерокосмічна, стоматологічна та металооптика тощо, широко використовують високоякісні мідні дзеркала. Оскільки мідь є м'яким і хімічно реактивним матеріалом, обробка її поверхні на нанорівні є складним завданням. Щоб задовольнити цю потребу, було розроблено [44] новий магнітореологічний метод для точного оброблення поверхонь діамагнітних матеріалів. Два циліндричні постійні магніти разом із магнітореологічною полірувальною рідиною були використані для обробки заготовки з діамагнітного мідного сплаву. Інструмент із циліндричними постійними магнітами з магнітореологічною полірувальною рідиною на поверхні виконує обертальні рухи над поверхнею заготовки з мідного сплаву та виконує фінішне оброблення жорсткою магнітореологічною полірувальною рідиною.

Інструмент для фінішної обробки з постійними магнітами разом із магнітореологічною полірувальною рідиною на його поверхні наконечника та заготовкою з діамантної міді були змодельовані, в програмному забезпеченні Maxwell Ansoft V13. Отримано та проаналізовано розподіл магнітної індукції в робочому зазорі. Експерименти проводились на заготовці з мідного сплаву, і найменше значення R_a 0,028 мкм досягається за час оброблення 7,5 хв з початкового значення R_a у 0,273 мкм. Характеристики поверхні як полірованої, так і неpolірованої заготовки аналізуються за допомогою скануючої електронної мікроскопії (СЕМ) і атомно-силової мікроскопії (АСМ). Зовнішній вигляд поверхонь отриманих в результаті СЕМ та АСМ методів електронної мікроскопії представлено на рис. 1.19 та 1.20 відповідно.

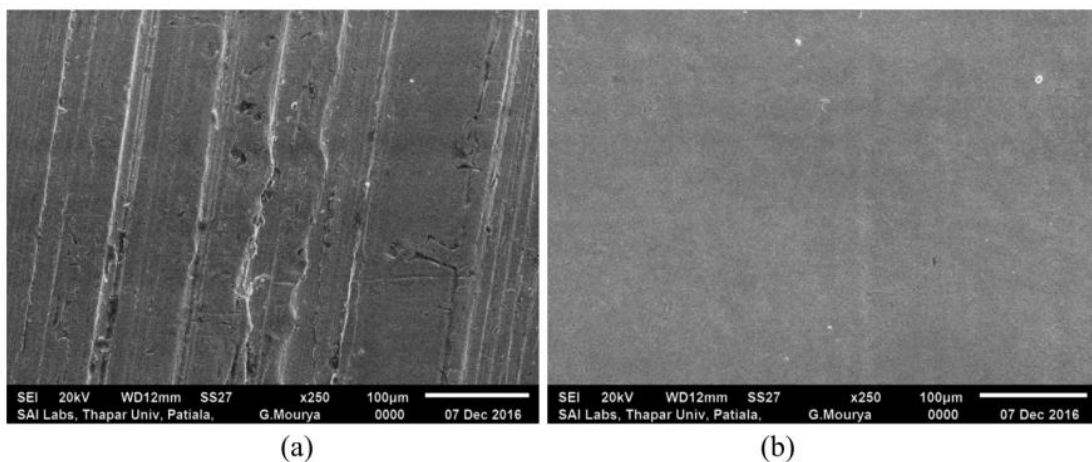


Рис. 1.19 Скануюча електронна мікроскопія (СЕМ) заготовки з мідного сплаву (а) до та (b) після циклу MAO

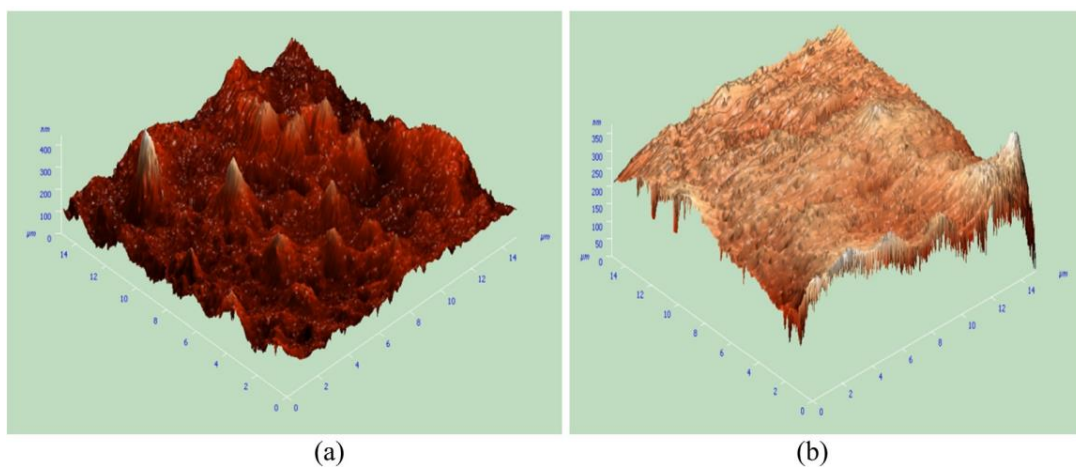


Рис. 1.20 Результати атомно-силової мікроскопії (АСМ) (а) до і (b) після оброблення

Результати, отримані експериментально, показали, що ця нова техніка придатна для нанофінішного оброблення діамагнітних матеріалів для виготовлення металевих дзеркал та електродів для електроерозійного оброблення.

У [45, 46] синтезовано установку МАО (рис. 1.21), яка призначена для обробки площин заготовок із суперсплаву Inconel 718.



Рис. 1.21 Зображення експериментальної установки із дерев'яним зажимом

Абразивну суміш готують до експериментів шляхом однорідного змішування феромагнітних частинок (порошок заліза розміром 350 мкм) та абразивних частинок (порошок карбіду кремнію розміром 600 мкм). Для забезпечення магнітного поля для проведення експерименту використовуються магніт Nd-Fe-B (неодимовий залізно-борний) із 0,52 Тл. Досліджено вплив робочого зазору, швидкості обертання та співвідношення у суміші складових у вигляді заліза та абразивного порошку на процентну зміну шорсткості поверхні (% ΔRa). Серія експериментів була проведена з використанням моделювання експерименту за допомогою ортогонального масиву Taguchi L9. Таблицю ANOVA було використан для визначення найбільш впливового параметра процесу. Авторами відмічено, що робочий зазор і швидкість є важливими параметрами процесу.

У статті аналізуються результати експериментів в ході проведення оброблення заготовки із інконелю 718, було зроблено наступні висновки, що найбільший вплив

на протікання процесу має робочий зазор, а другим по величині є швидкість обертання індуктора (рис. 1.22).

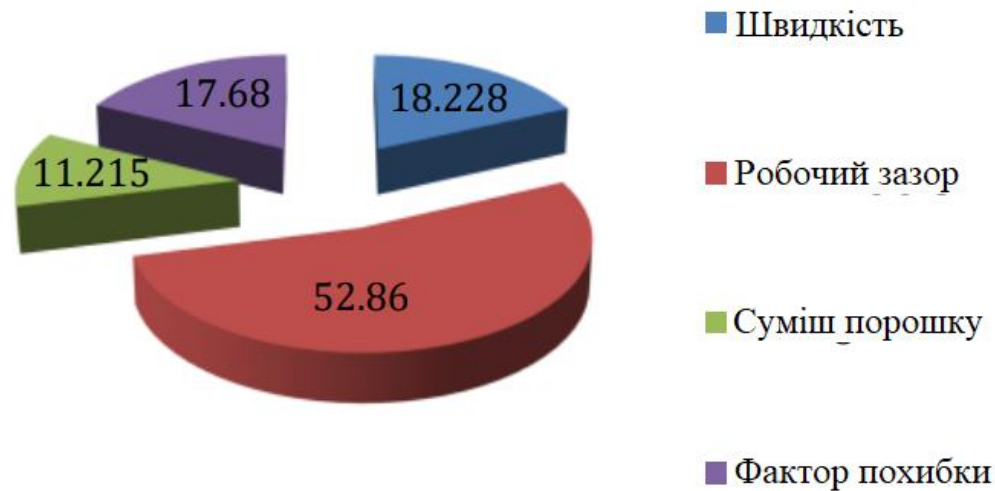


Рис. 1.22 Внесок параметрів процесу у процентну зміну шорсткості поверхні

В дослідженнях наведених в статті [47] розглянуто взаємодію між ключовими параметрами процесу магнітно-абразивної обробки (МАО) для покращення якості оброблюваних поверхонь. Усі експериментальні дослідження проводились на модифікованому верстатному обладнанні, схему якого показано на рис. 1.23 Розглянуто п'ять параметрів процесу: робочий зазор, швидкість обертання, швидкість подачі, кількість та розмір абразиву, коли МАО виконували незалежно двома абразивними частинками — SiC та Al₂O₃.

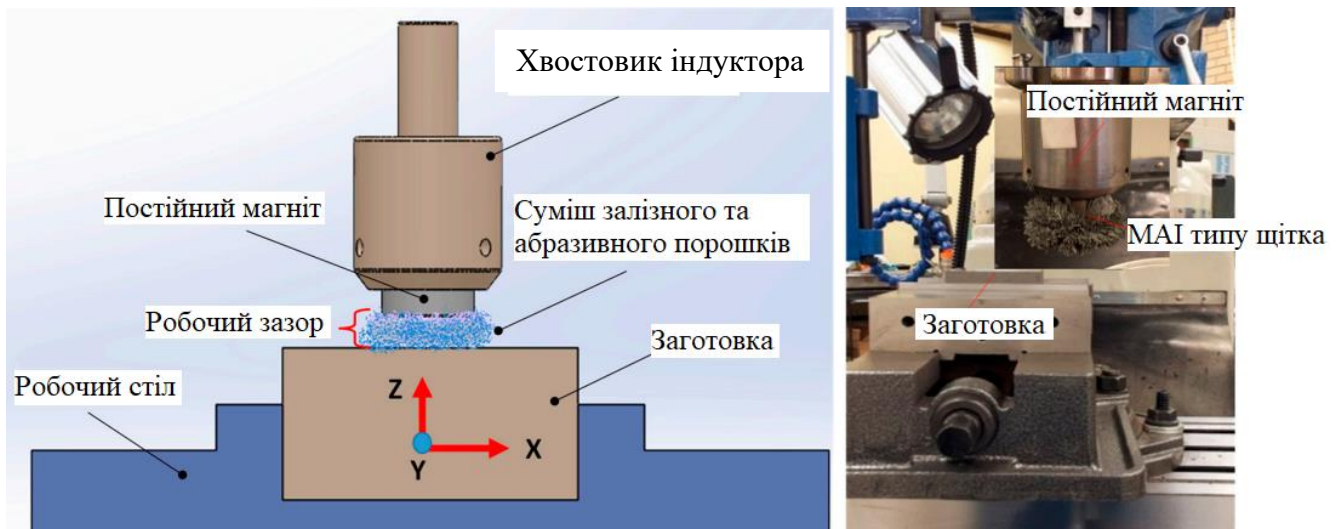


Рис. 1.23 Схема магнітно-абразивної обробки (ліворуч) та експериментальна установка (праворуч)

Було проведено серію експериментів за допомогою змодельованого власного інструменту. На основі результатів було розроблено модель прогнозування зменшення шорсткості. Результати показують, що покращення якості поверхні та основної домінанти параметрів процесу є унікальними для використовуваного типу абразиву. Коли проводять MAO із використанням абразивних частинок SiC, кількість абразиву та швидкість обертання мають найбільший вплив. З іншого боку, коли виконується MAO із використанням в якості абразивної фракції Al_2O_3 , тенденція відрізняється від SiC, тобто розмір фракції абразиву та робочий зазор є домінуючими параметрами. Модель прогнозу була добре підтверджена незалежними експериментами, що свідчить про її точність в оцінці та оптимізації результату процесу.

Авторами в [48] проведено MAO із використанням верстатів з комп'ютеризованим числовим керуванням (ЧПК) безпосередньо після процесу фрезерування. У цьому дослідженні представлено новий MAI, зображено на рис. 1.24, з одним великим постійним магнітом і новою конструкцією верхньої кришки для обробки простих феромагнітних заготовок. Конструкція торцевої поверхні інструменту у поєднанні з оптимізованим робочим зазором забезпечує ефект механічного ущільнення порошку, що призводить до значного підвищення продуктивності процесу та зменшення шорсткості поверхні.

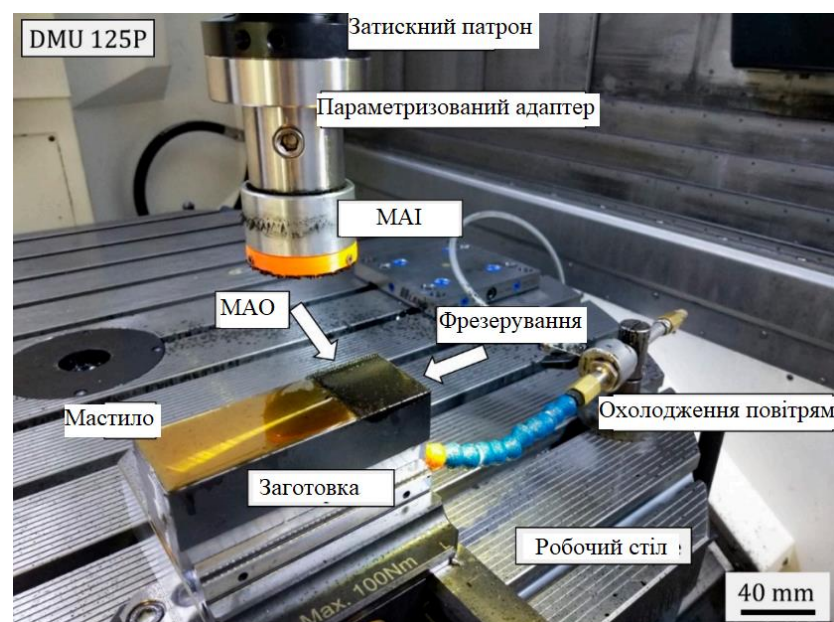


Рис. 1.24 Експериментальна установка для MAO на верстаті з ЧПК

Досліджено вплив параметрів процесу, таких як швидкість подачі, еквівалентна швидкість різання, робочий зазор (у тому числі для трьох розмірів зерен МАП) і зазор до магніту. Крім того, досліджено вплив початкової поверхні після фрезерування кінцевою фрезою, торцевого фрезерування, фрезерування радіусною кінцевою фрезою та шліфування на якість поверхні після MAO. Крім того, три типові поверхні після фрезерування та MAO були проаналізовані. За допомогою магнітно-абразивної обробки можна досягти значного покращення якості початкових фрезерованих поверхонь до значень шорсткості до $Ra = 0,02$ мкм і $Rz = 0,12$ мкм за один етап обробки.

Цими ж дослідниками в [49] було проведено випробування п'яти типів МАІ, принципова схема яких наведена на рис. 1.25, із різними розмірами, кількістю та розташуванням постійних магнітів для оброблення феромагнітних матеріалів з різною швидкістю подачі та еквівалентною швидкістю різання. Щільність магнітного потоку була виміряна для всіх типів МАІ із використанням датчика Холла, розподіл представлено графічно. Представлено переваги нової структури торцевої поверхні індуктора та протестовано 20 типів структур. Оптимальні форми торцевої поверхні призводять до значного підвищення технологічності та зменшення шорсткості поверхні при MAO плоских поверхонь феромагнітних заготовок.

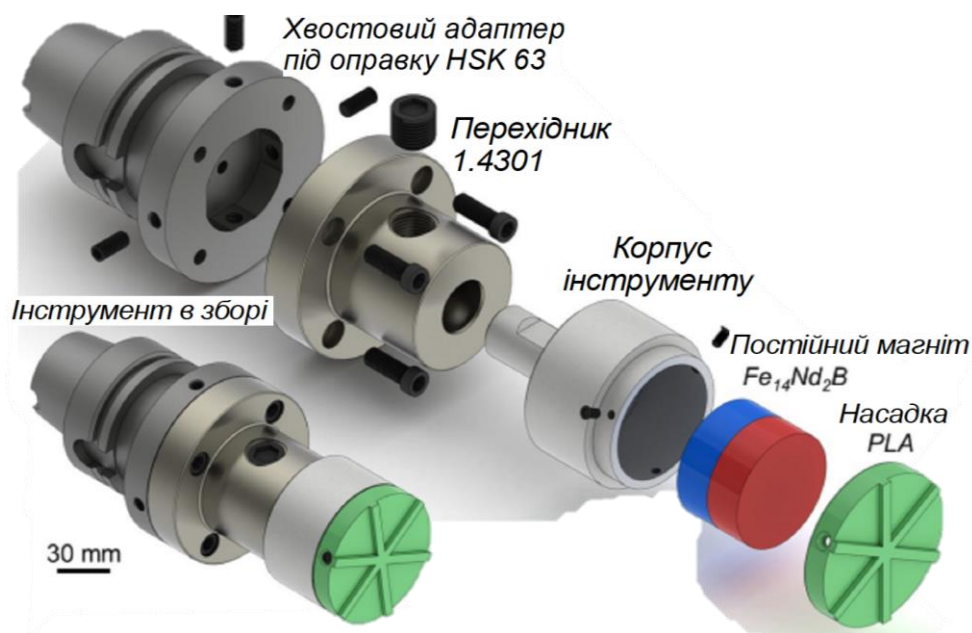


Рис. 1.25 Конструкція магнітно-абразивного інструмента

Результати цього дослідження можна підсумувати таким чином:

- 1) Торцева поверхня МАІ має прямий вплив на продуктивність та вихідні параметри процесу МАО, а самі конфігурації можна розділити на три групи залежно від конструкції бар'єру у напрямку руху порошку: без бар'єру – обробка виражена слабо, переривчастий бар'єр, що дає високу інтенсивність протікання процесу та безперервний бар'єр, що забезпечує дуже високу інтенсивність МАО.
- 2) Окрім матеріалу МАП, форми МАІ великий вплив має і матеріал кришки індуктора. Досліджувані матеріали структуровані залежно від досягнутої інтенсивності процесу: верхня кришка виготовлена адитивними методами з пластику (дуже висока), верхня кришка з фрезерованого пластику (від середньої до високої), верхня кришка з фрезерованого металу (низька).
- 3) Обґрунтовано доцільність використання одинарних, великих та високо-енергійних циліндричних постійних магнітів.

Авторами у [50] досліджується перспективна технологія МАО поверхонь, застосування якої дає змогу поліпшити якість поверхні компонентів складної форми, виготовлених за допомогою адитивного виробництва. Було досліджено вплив різних комбінацій МАФ і етапів термічної обробки на співвідношення між мікроструктурою та властивостями суперсплавів Inconel 718, виготовлених методом лазерного плавлення шару порошку (LPBF). Було встановлено, що застосування МАО значно зменшує шорсткість поверхні та призводить до подрібнення розміру зерна зістарених сплавів. Крім того, МАО позитивно впливає на пластичність сплаву, що можна пояснити впливом послідовного застосування МАО та термічного оброблення. Ця робота вказує на те, що ефективне поєднання обробки поверхні та термічної обробки має вирішальне значення для покращення характеристик сплаву. Крім того, робота демонструє багатообіцяюче рішення для покращення продуктивності LPBF Inconel 718 шляхом інтеграції МАО і термічної обробки, що надає нові перспективи оптимізації пост-обробки сплавів, виготовлених за допомогою добавок.

Висновки. Мета та задачі дослідження.

Аналіз науково-технічної інформації показав, що застосування магнітних головок торцевого типу дозволяє в окремих випадках забезпечувати фінішне оброблення різноманітних матеріалів. Проте, наведені результати обмежені чіткою інформацією про технологічні умови оброблення, відсутні практичні рекомендації що до застосування для виробів виготовлених з діамантних матеріалів значних габаритів. Практично відсутня інформація про реальні конструкції головок торцевого типу. Є напрацювання в області застосування MAO із використанням сумішей порошків для проведення оброблення, але наведеної інформації недостатньо. Наявні дослідження по мікроструктурі поверхневого шару оброблених матеріалів, але вплив на них MAO розглянуто недостатньо.

1. Процес MAO характеризується багатьма факторами, основними складовими процесу при цьому є: форма та потужність магнітного поля, кінематика процесу, фізико-геометричні параметри МАП, додатковий вплив інтенсифікуючих процесів.
2. Під час проведення MAO, оброблення супроводжують процеси та явища різної природи, які необхідно враховувати при дослідженні характеру формування МАІ та оброблених поверхонь.
3. В попередніх дослідженнях визначено, які фактори оброблення впливають на формування МАІ. Зокрема визначено вплив на MAO форми та потужності магнітного поля, розміри та композиція магнітно-абразивного порошку, особливості оброблюваної деталі, наявності ЗОТС, форми контактних поверхонь МАІ та оброблюваної деталі.
4. Наявна інформація про вплив факторів, які безпосередньо впливають на процес MAO та такі, що виникають між оброблюваною деталлю та МАІ при MAO є недостатньою для повного розуміння процесу. Проведені попередні дослідження мають або суто теоретичний характер, або обмежені окремими випадками оброблення та розгляду певних параметрів (наприклад оброблення в різних магнітних зазорах) тому необхідно значно розширювати експериментальну базу з врахуванням множини технологічних факторів оброблення, таких як,

матеріалів оброблюваної деталі та тих, що формують МАІ, розміру та форми деталей, розміру та типу частинок МАП, їх компонентний склад, величини магнітної індукції, кінематичних параметрів оброблення та ін.

Мета роботи: Формування інструментального середовища при магнітно-абразивному обробленні площин індукторами торцевого типу на базі високоенергетичних магнітів та дослідження явищ, що виникають у процесі оброблення з урахуванням впливу технологічних умов процесу, магнітореологічних характеристик, форми та складу МАІ, розмірів МАП та матеріалу оброблюваних деталей.

Задачі:

1. Виконати аналіз наявної інформації про використання МАО, особливості формування мікрогеометрії і фізико-механічних властивостей оброблюваних поверхонь та явищ, що супроводжують особливості трибо-механічної взаємодії, вплив властивостей МАІ та технологічних факторів процесу МАО на результати оброблення.
2. Розробити методику вимірювання фізико-механічних та якісних параметрів оброблюваних поверхонь, які мають місце при взаємодії магнітно-абразивного інструменту з оброблюваними деталями та синтезувати конструкції для формування МАІ. Визначити необхідні для дослідження матеріали та форми інструменту, абразивні матеріали та їх тип і склад для формування МАІ.
3. Провести комплексні дослідження зміни фізико-механічних та якісних параметрів оброблюваної деталі та вплив складових МАІ. Визначити вплив факторів технологічного характеру на оброблення.
4. Дослідити характер зміни параметрів оброблюваних поверхонь, що мають місце при взаємодії оброблюваної деталі та МАІ в умовах процесу МАО.
5. Встановити вплив властивостей матеріалу, розміру та форми частинок магнітно-абразивного порошку на характер взаємодії між оброблюваною деталлю та МАІ з урахуванням зміни технологічних факторів процесу оброблення. Розробити рекомендації по ефективному фінішному обробленню деталей методом МАО.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРИ ФОРМУВАННІ ПОВЕРХОНЬ ПРИ МАГНІТНО-АБРАЗИВНОМУ ОБРОБЛЕННІ

У дослідженні проведено ряд експериментів, метою яких було визначення особливостей формування магнітно-абразивного інструменту під час МАО шляхом вимірювання параметрів якості поверхні отриманих внаслідок оброблення з урахуванням різних впливових факторів. Експериментальна частина роботи включала серії досліджень, спрямованих на вивчення впливу кожного окремого фактора на параметри, що виникають під час МАО. Ці дослідження були згруповані на дві основні категорії:

1. **Дослідження умов формування магнітно-абразивного інструменту** — проводились експерименти із різною робочою формою, конфігурацією та структурою МАІ, включно із варіацією складу магнітно-абразивних матеріалів, що дало змогу синтезувати раціональну конструкцію для оброблення.
2. **Дослідження явищ, що виникають під час оброблення** — проводились вимірювання різного роду, що дають змогу зробити висновки, щодо процесів, що протікають у приповерхневому шарі оброблюваного матеріалу.
3. **Дослідження якісних параметрів** — виконано вимірювання шорсткості та характер зміни величини опорної поверхні, поверхневих залишкових напружень та мікротвердості, що дають змогу зробити висновки, щодо якості отриманих параметричних даних після виконання процесу МАО.

Всі експерименти виконувались із використанням специфічного обладнання та інструментів, які були підібрані для забезпечення точності та достовірності результатів вимірювань. Для коректного проведення експериментів відомості про оброблюваний матеріал є не менш важливими ніж властивості матеріалів, що беруть участь у процесі магнітно-абразивної обробки, а також параметри обладнання, на якому виконувались дослідження. Крім того, для адекватної

інтерпретації числових даних, отриманих в результаті експериментів, необхідно розуміти залежності та взаємозв'язки, які формуються під час проведення МАО.

2.1 Матеріал досліджень

Магнітно-абразивну обробку виконували на зразках, матеріалами яких були обрано Сталь 45 та 40Х, так як дані сталі є універсальними матеріалами з високими фізико-механічними параметрами та властивостями для механічної обробки, а також володіють феромагнітними властивостями (рис. 2.1), фізико-хімічні властивості якої наведено в таблицях 2.1 та 2.2.

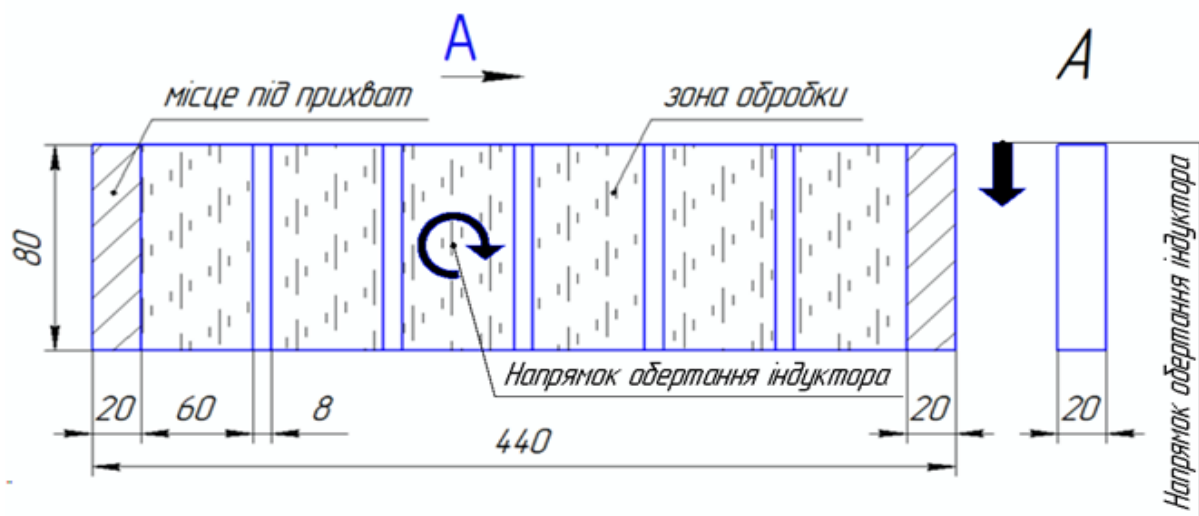


Рис. 2.1 Ескізне зображення дослідного зразка

Таблиця 2.1 - Хімічний склад у % матеріалів Сталь 45 та 40Х

Легуючі елементи	Відсоткова частка у матеріалі, %	
	Сталь 45	Сталь 40Х
С (Вуглець)	0,42 - 0,5	0,37 - 0,45
Si (Кремній)	0,17 - 0,37	≤ 0,35
Mn (Марганець)	0,5 - 0,8	0,6 - 0,9
Ni (Нікель)	< 0,25	< 0,3
S (Сірка)	< 0,04	≤ 0,035

Продовження таблиці 2.1 - Хімічний склад у % матеріалів Сталь 45 та 40Х

P (Фосфор)	< 0,035	$\leq 0,035$
Cr (Хром)	< 0,25	0,3 - 0,6
Cu (Мідь)	< 0,25	< 0,3
As (Арсен)	< 0,08	-

Таблиця 2.2 - Механічні властивості при $T = 20^{\circ}\text{C}$ матеріалів Сталь 45 та 40Х

Сортамент	σ_b	σ_T	δ_s	ψ	KCU	Термообробка
-	МПа	МПа	%	%	кДж/м ²	-
Сталь 45						
Смуга гарячекатана	600	-	16	40	-	Стан поставки (без обробки)
Сталь 40Х						
Прутки	655	-	15	45	59	Стан поставки (без обробки)

2.2 Визначення типу і матеріалу постійного магніту для його застосування при створенні торцевої головки

Постійний магніт — це об'єкт, виготовлений з матеріалу, який має високу залишкову магнітну індукцію і зберігає свою намагніченість протягом тривалого часу. Постійні магніти мають різні геометричні параметри та магнітні характеристики і використовуються як автономні джерела магнітного поля.

Характеристики магніту визначаються ділянкою розмагнічення петлі магнітного гістерезису матеріалу, з якого він виготовлений. Чим вища залишкова індукція B_r і коерцитивна сила H_c , тим більша намагніченість і стабільність магніту.

Індукція постійного магніту B_d не може перевищувати B_r . Рівність $B_d = B_r$ можлива лише в умовах замкнутого магнітопроводу без повітряних проміжків. Однак постійні магніти зазвичай використовуються для створення магнітного поля в повітрі або іншому середовищі, де B_d буде менше за B_r . Різниця між B_d і B_r залежить від форми магніту та властивостей навколишнього середовища.

Види та властивості постійних магнітів:

1) Феритові магніти (керамічні магніти) виготовлені з оксидів заліза та інших металів. Вони дешеві, мають гарну стійкість до корозії, але порівняно низький рівень магнітної індукції. Застосовуються в холодильниках, динаміках, комунікаційних пристроях. Хімічний склад таких магнітів дозволяє матеріалу зберігати магнітні властивості в діапазоні температур - від -30°C до $+270^{\circ}\text{C}$.

Магніти поставляються у формі феритових кілець, брусків, циліндрів, дисків, пластин, тороїдів та інших форм, що широко використовуються в промисловості, побуті, електроніці та техніці. Дані магніти використовуються в акустичних системах, генераторах, електродвигунах постійного струму. В автомобільній промисловості феритові магніти використовуються у стартерах, склопідйомниках, системах охолодження та вентиляторах. Постійні магніти широко застосовується в різних галузях завдяки своїй здатності підтримувати магнітне поле без зовнішнього джерела енергії. Їх різноманітні властивості дозволяють адаптувати їх для конкретних потреб в техніці, промисловості та побуті [51-55]. Також спостерігається тенденція по використанню процесів адитивного виробництва таких як FDM, SLA, SLM, EBM та інших для виробництва постійних магнітів складної геометричної форми.

Для феритових магнітів характерною є коерцитивна сила близько 200 кА/м і залишкова магнітна індукція близько 0,4 Тесла. Термін збереження магнітних властивостей феритових магнітів від 10 до 30 років.

2) Алніко магніти (алюміній-нікель-кобальт, Al-Ni-Co)

Сплави, що містять алюміній, нікель і кобальт. Таким магнітам характерні висока температурна стійкість і стабільність: вони зберігають свої магнітні властивості при температурі до $+550\text{ }^{\circ}\text{C}$, хоча коерцитивна сила, для магнітів цієї групи - порівняно мала [56]. Використовуються в спеціальних вузлах, таких як магнітні датчики і в магнітофонах. Недоліком вважається втрата вихідні магнітні властивостей під дією малопотужного магнітного поля

Характерна коерцитивна сила близько 50 кА/м , а залишкова намагніченість близько $0,7\text{ Тл}$.

Вміст компонентів в сплавах альніко змінюється варіюється у межах: Al - від 7 до 10%, Ni - від 12 до 15%, Co - від 18 до 40%, від 3 до 4% - Cu.

Чим більше у сплаві кобальту, тим вище індукція насичення і сила магнітного поля. Присадки у вигляді титану - 2 до 8% та 1% - ніобію - підвищують коерцитивну силу - до 145 кА/м . Додавання від 0,5 до 1% кремнію забезпечує рівномірність магнітних властивостей по всьому об'єму матеріалу.

3) Самарій-кобальтові магніти

Магніти даної групи мають високу магнітну індукцію і хорошу термостійкість. Використовуються в жорстких умовах, таких як авіаційні та космічні системи. відрізняються стійкістю до корозії, окислення і температур до $+350\text{ }^{\circ}\text{C}$ [57]. Хоча за вартістю самарієві магніти дорожчі за неодімові за рахунок дефіцитного металу - кобальту. Проте, їх доцільно застосовувати тоді коли, необхідні мінімальні розміри, теплостійкість та вага виробів.

Найбільшого застосування магніти даної групи набули в космічних апаратах, авіаційній та комп'ютерній техніці, електродвигунах і магнітних муфтах малого розміру, також вони застосовуються в носимих приладах і пристроях – наручні годинники, навушники, смартфони і т.д.)

Завдяки винятковій корозійній стійкості, саме самарієві магніти використовують в стратегічних та військових розробках. Самарій-кобальтові магніти застосовуються у електродвигунах, генераторах, підйомниках, авто- та фототехніці, магніти даної групи ідеально підходить для складних умов

експлуатації та агресивних середовищ. Коерцитивна сила становить близько 700 кА/м, а залишкова магнітна індукція ~ 1 Тесла.

4) Магнітопласти

Магнітний порошок у по'єднанні із сполучним компонентом створює гнучкий, м'який та легкий магніт [58]. В якості сполучних компонентів виступають такі матеріали як: каучук, вініл, акрил або пластик, що дає змогу формувати різноманітні форми і розміри.

Магнітна сила, значно знижується так як осередками магнітного поля є окремі часточки, до того ж магнітній силі перешкоджає сполучний матеріал, але такі рішення необхідні у виробництві рекламної продукції, швидкозйомних стікерів та наклейок на авто, а також у канцелярії та сувенірних виробках.

5) Неодим-ферум-борати ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$)

Магніти групи неодим + залізо + бор [59]. Характеризуються високим рівнем магнітної індукції, сили намагнічування і стійкістю до розмагнічування. Дані магніти застосовуються з 1980-х років. У більшості випадків вони виготовляються методом порошкової металургії – це процес попереднього формування та пресування з подальшим спіканням в атмосфері, яка складається із інертного аргону. Зазвичай неодимові магніти додатково покривають захисним металізованим покриттям із нікелю, міді, цинку та золота.

Ці магніти часто називають супермагнітами і використовують в жорстких дисках, магнітних генераторах, магнітно-резонансних апаратах (процедури магнітно-резонансної томографії), метало детекторах, масляних фільтрах та в інших приладах та установках, де необхідне використання сильного магнітного поля. До переваг такого магнітного матеріалу відносять високу силу магніту при малих розмірах та стабільність магнітних властивостей при нормальних умовах. До недоліків відносять крихкість, чутливість до високих температур та втрата магнітних властивостей внаслідок термічної взаємодії, а також схильність до корозії без захисного покриття.

Властивості неодим-залізо-борних магнітів наведено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 Властивості магнітів

Властивість	Значення
Склад	$\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ (Неодим-Залізо-Бор)
Максимальна магнітна енергія	30-55 МГаус*см ³ (MG/Oe)
Максимальна температура експлуатації	~80-200°C (для стандартних варіантів виготовлення)
Магнітна залишкова індукція (Br)	1.0-1.4 Тесла (Т)
Коефіцієнт температури магнітної індукції	-0.1% / °C
Критична температура	~310-400°C (в залежності від якості)
Максимальне магнітне поле (HcJ)	750-1500 кА/м (kA/m)
Міцність на розрив	Варіюється в залежності від розміру, форми та січення
Корозійна стійкість	Низька (без покриття)
Щільність	7.5-8.4 г/см ³

Оскільки проведення експериментальних досліджень не передбачає ударні режими роботи та биття, а робочі температури магнітної системи не перевищують максимальну температуру експлуатації матеріалів, то доцільно використовувати при дослідженнях саме неодимові магніти.

2.2 Верстатне обладнання для проведення експериментальних досліджень та параметри механічної обробки

Підготовка поверхні заготовки для проведення серії експериментів магнітно-абразивного оброблення проводилась в 3 етапи:

- 1) Фрезерування на універсальному вертикально-фрезерному верстаті, що призначений для обробки деталей фрезеруванням, свердлінням, нарізанням різьблення і багатьох інших процесів моделі 6М12ПБ (рис. 2.1). Даний вид обробки проводився для досягнення плоскопаралельності заготовки,

площинності та повторюваності вихідних значень шорсткості для порівняння, режими різання при фрезеруванні: частота обертання – 100 об/хв., подача – 80 мм/хв.

Коротка характеристика верстату наведена в таблиці 2.4.

Таблиця 2. 4 - Основні характеристики верстату 6М12ПБ

Параметр	Значення
Тип верстату	Універсальний горизонтально-фрезерний станок
Розміри робочого столу	- Довжина - 1400 мм; - Ширина 320 мм;
Хід по осям	- X-координата - 800 мм; - Y-координата - 315 мм; - Z-координата - 400 мм.
Максимальна висота оброблення	400 мм
Швидкість обертання шпинделя	80-1120 об/хв.
Потужність головного електродвигуна	2,2–4 кВт (в залежності від конфігурації та модифікації верстату)
Максимальний діаметр свердління	До 32 мм



Рис. 2.1 Верстат мод. 6М12ПБ

В якості інструменту використовували торцеву фрезу із змінними вставками (рис. 2.2). Це дозволяє зберігати основну частину інструмента і міняти тільки

зношені частини. Такий вид інструменту застосовується для обробки поверхонь деталей шляхом фрезерування. Вона отримала свою назву через те, що основна частина її робочої поверхні розташована перпендикулярно до осі обертання фрези, що дозволяє виконувати обробку в площині, паралельній поверхні деталі.

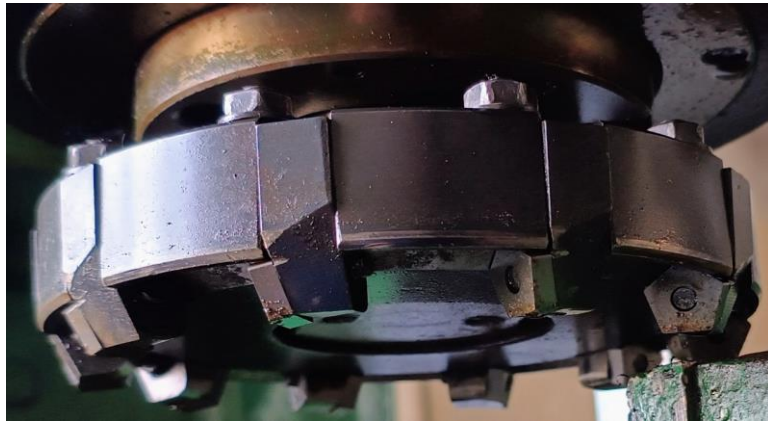


Рис. 2.2 Торцева фреза із змінними твердосплавними п'ятигранними вставками

2) Шліфування на плоскошліфувальному верстаті 3Г71М (рис. 2.4). Це універсальний верстат для шліфування плоских поверхонь. Цей тип верстата широко використовують для точного оброблення металевих, пластикових і дерев'яних деталей у промислових умовах. Основні характеристики і особливості верстата 3Г71М наведені в таблиці 2.5:

Таблиця 2.5 - Основні характеристики верстату 3Г71М

Параметр	Значення
Тип верстату	Плоскошліфувальний верстат з ручними органами керування
Розміри робочого столу	- Довжина - 800 мм; - Ширина - 250 мм;
Хід по осям	- Х-координата - 450 мм; - Y-координата - 250 мм;
Максимальна висота шліфування	250 мм
Швидкість обертання шліфувального круга	1500-3000 об/хв. (залежно від типу круга)
Потужність головного електродвигуна	1,5–2 кВт
Можливість обробки під кутом	Присутня



Рис. 2.4 Універсальний плоскошліфувальний верстат мод. 3Г71М

Даний вид обробки був обраний для того, щоб позбутись спадковості після оброблення фрезерними методами та отримати рівномірну вихідну поверхню для співставлення після МАО.

- 3) Магнітно-абразивне оброблення. Після шліфувальної обробки заготовку розміщували на широко-універсальному інструментальному верстаті моделі 6Б75ВФ1 (Рис. 2.5) на якому проводили процес магнітно-абразивної обробки. Цей верстат належить до класу вертикально-фрезерних верстатів для високоточних робіт. Основні характеристики і особливості верстата 6Б75ВФ1 наведені в таблиці 2.6:

Таблиця 2.6 - Основні характеристики верстату 6Б75ВФ1

Параметр	Значення
Тип верстату	Широко-універсальний інструментальний верстат
Розміри робочого столу	- Довжина - 1600 мм; - Ширина - 320 мм;
Хід по осям	- Х-координата - 1000 мм; - Y-координата - 350 мм; - Z-координата - 400 мм;

Продовження таблиці 2.6 - Основні характеристики верстату 6Б75ВФ1

Максимальна швидкість обертання шпинделя:	2000 об/хв.
Подача	Ручна та автоматична
Можливість обробки під різними кутами	Присутня
Навантаження на стіл	до 800 кг
Потужність головного електродвигуна	1,5 кВт



Рис. 2.5 Універсальний вертикально-фрезерний верстат мод. 6Б75ВФ1

В ході проведення досліджень сталими були наступні параметри:

- 1) частота обертання торцевої головки – $n = 900$ об/хв;
- 2) подача - 10 мм/хв.
- 3) тип головки.

До параметрів експерименту, які варіювались відносяться:

- 1) Робочий зазор - h , в межах від 2 до 4 мм;
- 2) Магнітно-абразивна суміш (як в складі моно-порошку, так і в складі суміші порошків різної фракції, виду та з додаванням алмазних паст).

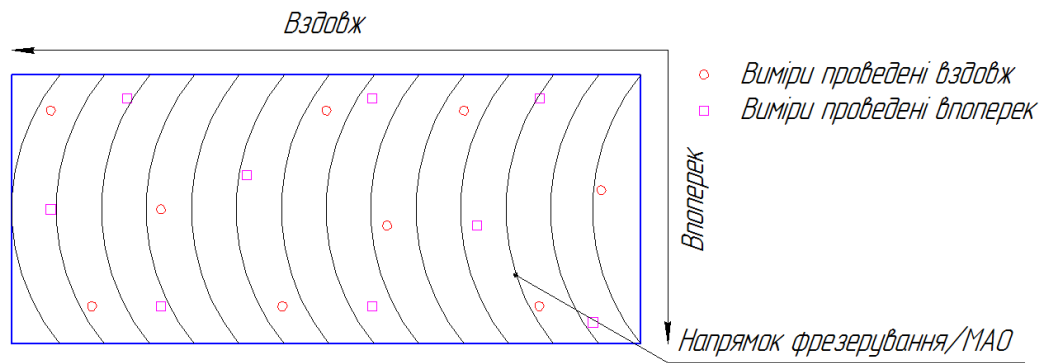


Рис. 2.6 Схема вимірювання шорсткості;

Перед проведенням процесу МАО виконувались підготовчі операції оброблення – фрезерування та шліфування, щоб забезпечити плоскопаралельність дослідного зразка, усунути спадкову хвилястість (надлишкову шорсткість, що має систематичний характер) після торцевої фрези та отримати початкові значення шорсткості в певних межах. Наступним етапом була обробка торцевим індуктором. Через компактний розмір торцевої головки для формування МАІ (Ø 50 мм) на одному зразку можна одразу провести серію із 7 експериментів з варіацією вхідних параметрів. Після МАО зразок очищали від залишків мастильних рідин, МАП та шламу, вимірювали шорсткість поверхні R_a і відносну опорну довжину профілю t_p .

Шорсткість R_a вимірювали в напрямку вздовж і впоперек, як показано на рис. 2.6. Вимірювання проводились із використанням профілографа-профілометра «мод. 252». Також додатково, для підтвердження та перевірки результатів вимірів було виміряно параметри шорсткості на портативному профілометрі Mahr Marsurf PS1 та приладу для вимірювання поверхневого профілю Taylor-Hobson Surtronic 2. Зображення мікропрофілю отримували за допомоги системи для вимірювання та аналізу поверхневої мікрогеометрії, що використовує технологію оптичної профілометрії для високоточних вимірів шорсткості, профілю та інших характеристик поверхні матеріалів на нанометровому рівні Usurf Nanofocus. Ця технологія дозволяє отримати детальні зображення мікрорельєфу поверхні з дуже високою роздільною здатністю (до нанометрів), що робить її корисною для наукових досліджень і промислових застосувань, де важливі точні вимірювання поверхні на дуже малих масштабах.





г)

Рис. 2.10 – Зображення вимірювального обладнання: а) Профілограф-профілометр «мод. 252»; б) Портативний профілометр Mahr Marsurf PS1; в) Прилад для вимірювання поверхневого профілю Taylor-Hobson Surtronic 2; г) Usurf Nanofocus

Для кожного дослідження брали 7 вимірювань вздовж та таку ж кількість поперек до напрямку шліфувальної обробки, після чого розраховували середнє значення шорсткості Ra_{CP} . Для визначення відносної опорної довжини профілю tr зазвичай достатньо 5 вимірювань, але у нашому випадку було обрано 7 вимірювань для підвищення точності обробки даних і результатів. Після кожного експерименту МАП, який використовували для обробки, очищали з поверхні торцевої головки, виконували огляд насадки на стан торцевої поверхні індуктора та використовували новий попередньо очищений від домішок та просіяних через набір сит порошок, який ще не приймав участі у процесі. Досліджувану поверхню попередньо оброблювали вище зазначеними способами, щоб досягти початкової шорсткості на рівні $Ra = 0,4-0,65$ мкм.

Згідно з методикою вимірювання, після кожної операції обробки на ділянці здійснювались заміри показників шорсткості за допомогою профілометра. Для цього проводились сім вимірів, як уздовж, так і поперек обробленої поверхні, після чого виконувались відповідні розрахунки.

Під час вимірювань контролювали шорсткість R_a та опорну довжину профілю в межах від 10% до 90%. При знятті профілограм за допомогою приладу Калібр «мод. 252» використовувалося горизонтальне збільшення ГЗ 500, вертикальне збільшення ВЗ 10000, швидкість руху становила 120 мм/хв, довжина траси вимірювання — 1,5 мм, а крок відсічки — 0,8 мм. Для детальнішого аналізу поверхневої мікрогеометрії обробленої поверхні проводили оцінку зміни величини R_a та визначали залежність зміни опорної поверхні профілю від відносної висоти мікронерівностей профілю $t_p = f(p)$.

Також слід зазначити, що майже весь мікрорельєф поверхні заготовки бере участь у процесі видалення матеріалу. При цьому активну взаємодію з оброблюваною поверхнею мають більше 70-80% висоти мікронерівностей поверхні різального інструмента, що безпосередньо залучені до процесу різання.

Таким чином, важливою характеристикою рельєфу заготовки є зміна величини опорної довжини профілю t_p в залежності від відносної висоти нерівностей p . Запропонована залежність зміни опорної ділянки профілю від величини мікропрофілю має вигляд функції: $t_p(p) = ap^6$. Ця функція описує ділянку кривої від початкової частини до відносної висоти 0,3–0,4, що є явно недостатнім для повного опису.

Крім того, при порівнянні значень, що характеризують зміну величини $t_p = f(p)$, виникає необхідність проведення якісної оцінки, яка вимагає введення інтегральних параметрів або формулювання отриманих залежностей для подальшого аналізу.

$$t_p(p) = a_1 \cdot p^{a_2} \cdot e^{-a_3 p} \quad (2.1)$$

де a_1 , a_2 , a_3 — деякі коефіцієнти апроксимації; t_p — значення величини відносної опорної поверхні на відповідному рівні мікропрофілю p .

Залежність, представлена у вигляді рівняння (2.1), має точку перегину, яка відповідає максимальному значенню зміни щільності відносної опорної довжини профілю. Це значення фактично визначає рівень мікропрофілю p , на якому відбувається перехід від вершин профілю до впадин. Значення p , які відповідають цим точкам, можна отримати, взявши похідну від функції (2.1).

$$p_0 = \frac{a_2 - \sqrt{a_2}}{a_3} \quad (2.2)$$

Таким чином залежність $t_p = f(p)$ має умовне розділення на дві частини:

- а) до величини відносної величини рівня профілю p_0 – характеризує виступи;
- б) інша – характеризує западини при $p > p_0$.

2.3 Підготовка індуктора для полірування площин

При обробці площин найбільш поширені схеми оброблення торцевою чи периферійною головкою, в нашому випадку було розроблено і виготовлено торцеву головку з використанням циліндричного постійного магніту FeNdB (Рис. 2.7 - 2.8)

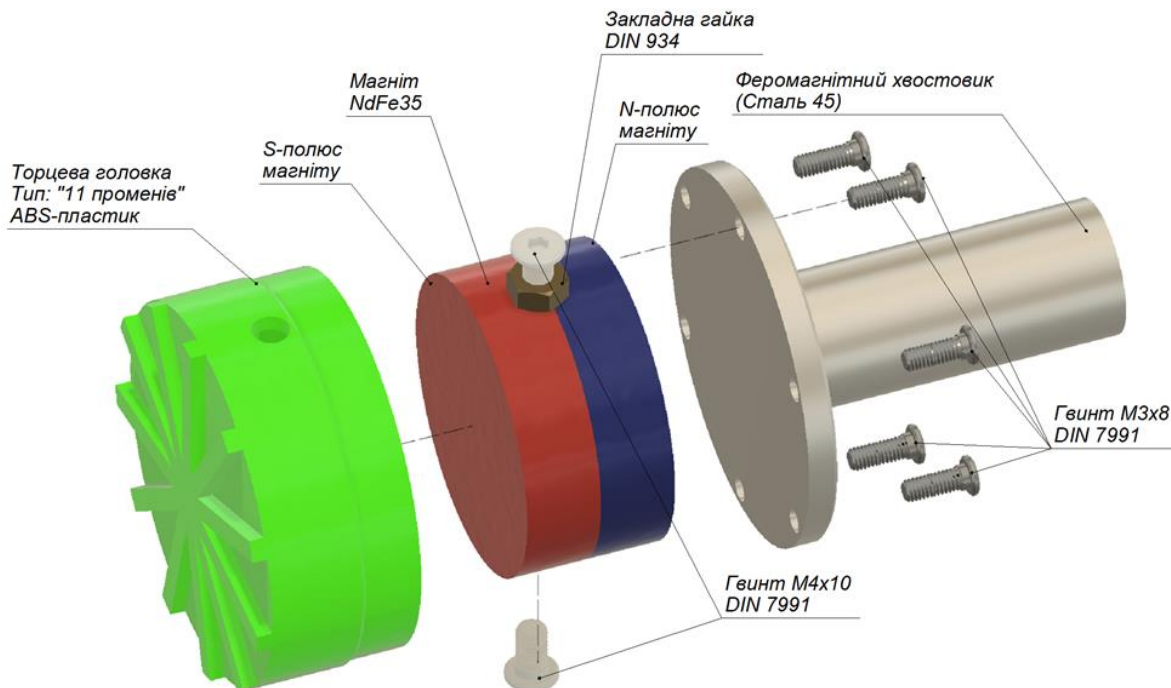


Рис. 2.7 Схематичне зображення магнітно-абразивної головки в зборі



Рис. 2.8 Зображення магнітно-абразивної головки змонтованої на верстатному устаткуванні

Торцева головка, згідно схематичного зображення (рис. 2.8) має склад наступного виду:

- Пластиковий корпус із ABS-пластмаси. В силу відсутності магнітних властивостей виступає ізолятором між магнітно-абразивним порошком та магнітом;
- Високоенергетичного цільного неодимового магніту ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$);
- Феромагнітного сталевого хвостовика-кришки під цанговий затискний механізм верстату; складається з пластикового корпусу, неодимового магніту

Корпус та хвостовик індуктора з'єднані між собою метизною продукцією із використанням метричного різьблення.

Корпус магнітно-абразивного інструменту (MAI) був виготовлений за допомогою адитивної технології 3D-друку, зокрема методу наплавлення (Fused Deposition Modeling, FDM) [60]. Цей метод є однією з найпопулярніших адитивних

технологій, що дозволяє створювати тривимірні об'єкти шляхом послідовного нанесення тонких шарів термопластичного матеріалу, який плавиться і одразу ж кристалізується, формуючи необхідну форму відповідно до цифрової тривимірної моделі.

В процесі FDM, матеріал для друку подається в робочу зону у вигляді дротів або прутків, які нагріваються до критичної температури переходу до пластичного стану і екструдуються через сопло, що рухається за траєкторією сформованою по принципу роботи верстатів з ЧПК (Числове програмне керування). Кожен новий шар наносять поверх попереднього, що дозволяє поступово створювати об'єкт з урахуванням всіх його геометричних особливостей. Після завершення друку і охолодження, частини можуть підлягати додатковій постобробці для досягнення потрібної точності та якості поверхні.

Технологія FDM є відомою своєю універсальністю і здатністю використовувати різноманітні термопластичні матеріали, такі як PLA (полілактид), ABS (акрилонітрил-бутадієн-стирол) та PETG (поліетилентерефталат-гліколь), що забезпечують різні властивості, такі як міцність, гнучкість та стійкість до температури. Це робить метод ідеальним для виготовлення корпусів інструментів, прототипів та виробів з складною геометрією, оскільки він дозволяє швидко адаптуватися до змін у конструкції і швидко виготовляти деталі з точністю до декількох сотих міліметрів.

Фізичні властивості матеріалів, використаних у процесі FDM, включають високу міцність на розтяг та удар, стійкість до деформацій при нагріванні, а також можливість легкої обробки після друку. Властивості використаного матеріалу наведені в таблиці 2.9 Це робить їх підходящими для створення корпусів, які повинні витримувати значні навантаження і агресивні умови експлуатації, включаючи умови роботи в хімічно-активних середовищах.

Таблиця 2.7 - Фізико-механічні властивості ABS-пластмас

Параметр	Значення
Густина	1,02-1,08 г/см ³
Міцність на розрив	35-50 МПа
Міцність при згині	35-50 МПа
Міцність при стисканні	46-80 МПа
Термічна усадка	10-25 %
Вологопоглинання	0,2-0,4 %
Модуль пружності при розтязі	1700 - 2930 МПа
Ударна в'язкість по Шарлі	10-30 кДж/м ²
Твердість по Брінелю	90-150 МПа
Теплостійкість по Мартенсу	86-96 °С
Температура розм'якшення	90-105 °С
Максимальна температура довгострокового використання	75-80 °С
Діапазон технологічних температур	200-260 °С
Діелектрична проникність при 10 ⁶ Гц	2,4-5,0
Тангенс кута діелектричних втрат	(3-7)·10 ⁻⁴
Питомий об'ємний електричний опір	5·10 ¹³ Ом/м
Електрична проникність	12-15 МВ/м
Температура самозаймання	395 °С

Схематичне зображення процесу створення шарів матеріалу при моделювання методом наплавлення представлено на рис. 2.№10.

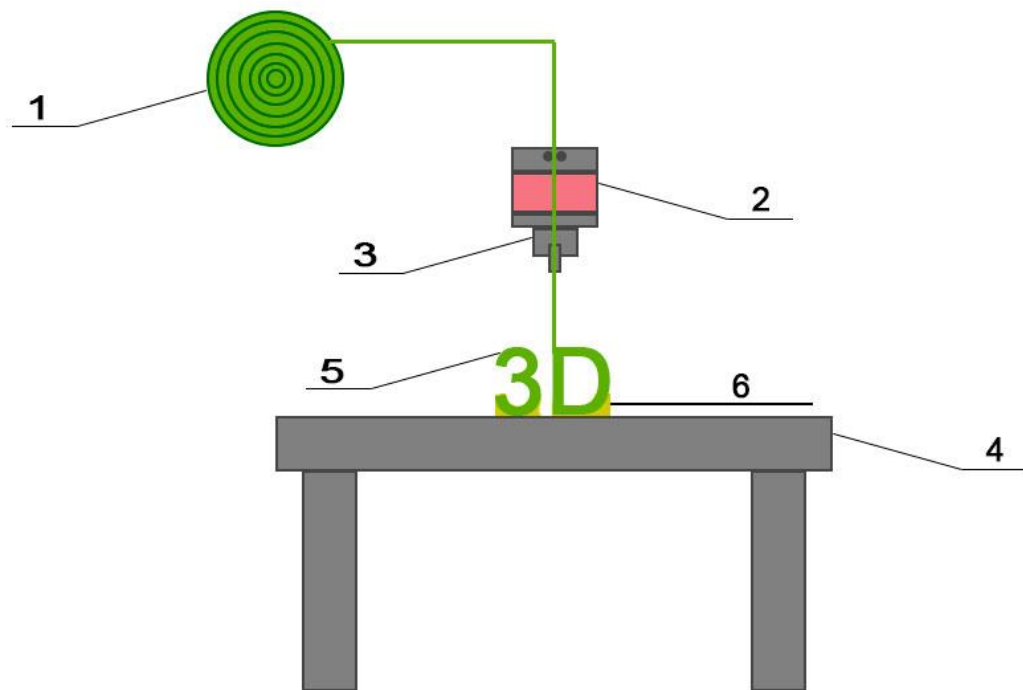


Рис. 2.10 – Процес 3D друку

На рис. 2.10 зображено наступні позиції:

1. Джерело філаменту;
2. Нагрівальний елемент для плавлення матеріалу;
3. Змінне сопло;
4. Платформа для друку (зазвичай комплектується пристроєм для підігріву або охолодження робочої зони друку)
5. Об'єкт друку;
6. Опори (підтримки)

Друк індуктора було виконано на 3D принтері унікальної конструкції, що наявний у кафедральній лабораторії навчального корпусу №22. Зображення принтера наведені на рис. 2.11. При проектуванні МАІ було враховано попередні дослідження спрямовані на визначення впливу торцевої поверхні індуктора на проходження процесу МАО.

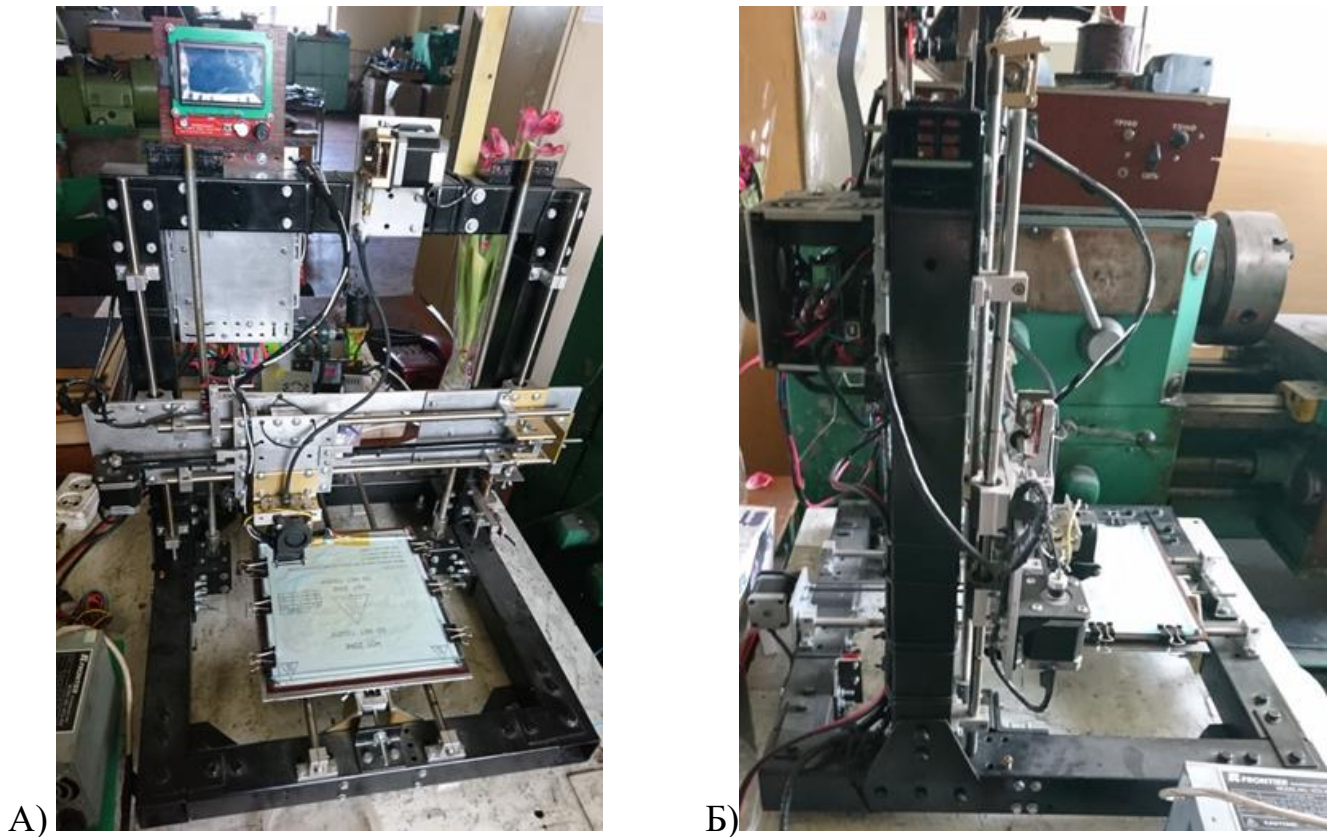


Рис. 2.11 – Зображення лабораторного 3D принтера: а) фронтальне зображення;
б) бокове зображення.

2.4 Обґрунтування застосування конструкції МАІ із використанням одного високоенергійного неодимового магніту

З огляду на висновки наведені дослідниками в [49] було проведено серію робіт по комп'ютерному моделюванню магнітного поля за використання різних конструкцій індуктора. Середовищем для моделювання було обрано програмне забезпечення ANSYS Maxwell [61, 62], як один із потужних інструментів для виконання моделювання електромагнітних середовищ як у площинному представленні так і у об'ємному. Застосування даного програмного продукту дає змогу виконувати комплексний аналіз силових, магнітних, векторних характеристик магнітних полів. Дослідження впливу форми та компоновання магнітної складової МАІ дозволить використати отримані результати моделювання для синтезу високопродуктивної та прогнозованої конструкції інструменту.

Для моделювання було створено три конструкції магнітно-абразивного індуктора на основі постійних неодимових магнітів:

- 1) Конструкція із використанням магніту типу «напівтор» розмірами $\varnothing 40 \times \varnothing 25 \times 20$ із феромагнітним осердям;
- 2) Конструкція із використанням компонування із множиною циліндричних магнітів розмірами: $\varnothing 10 \times 20$ та $\varnothing 5 \times 20$, які розташовані протилежними полюсами один відносно іншого. Зображено на рис. 2.11;
- 3) Конструкція із використанням одного неодимового магніту розмірами $\varnothing 40 \times 20$

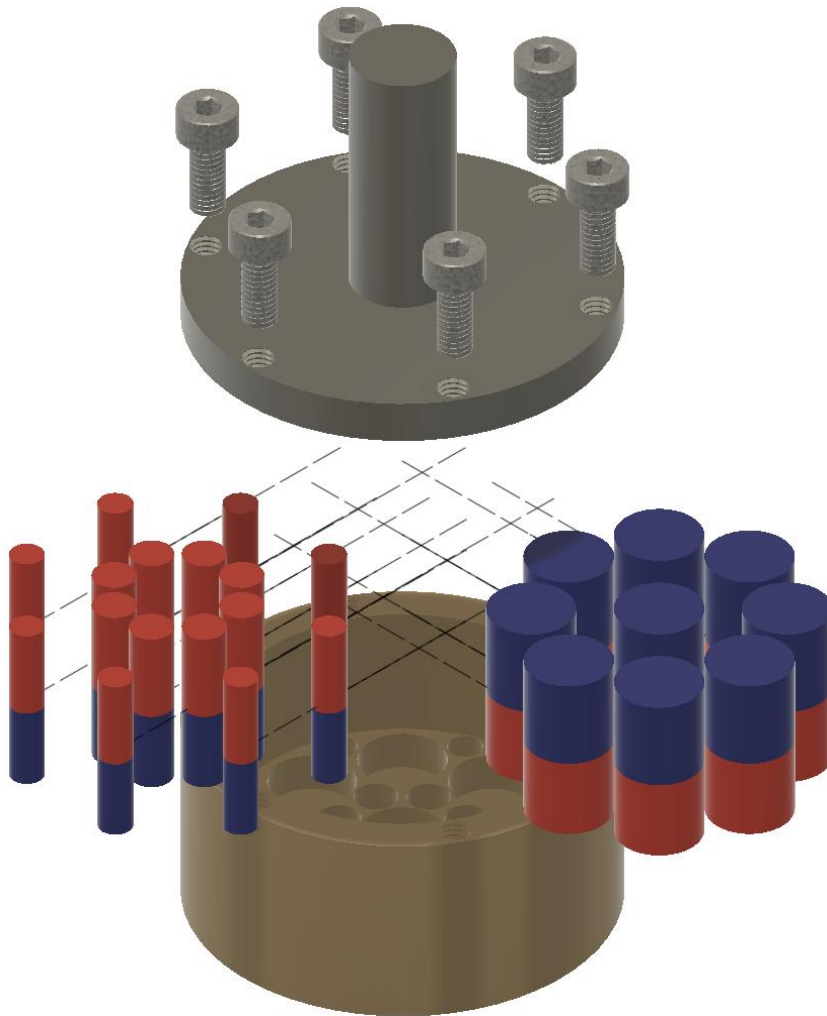


Рис. 2.11 Конструкція №1 із використанням компонування із множиною циліндричних магнітів

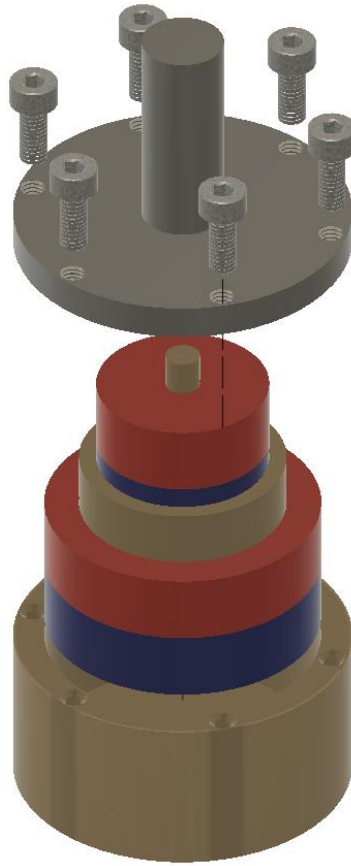


Рис. 2.12 Конструкція №2 із використанням магніту типу «напівтор»

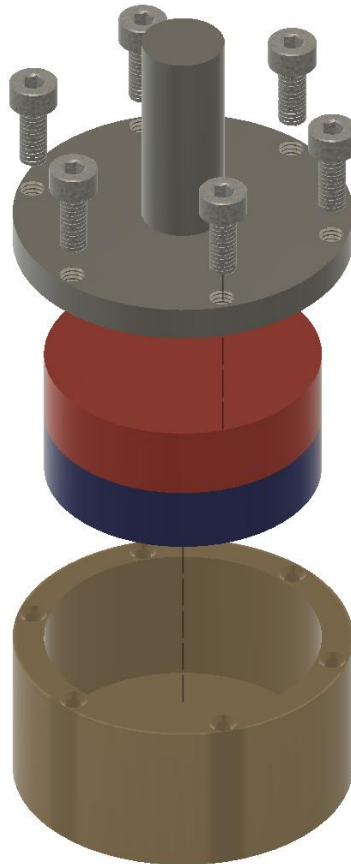


Рис. 2.13 Конструкція №2 із використанням магніту типу «напівтор»

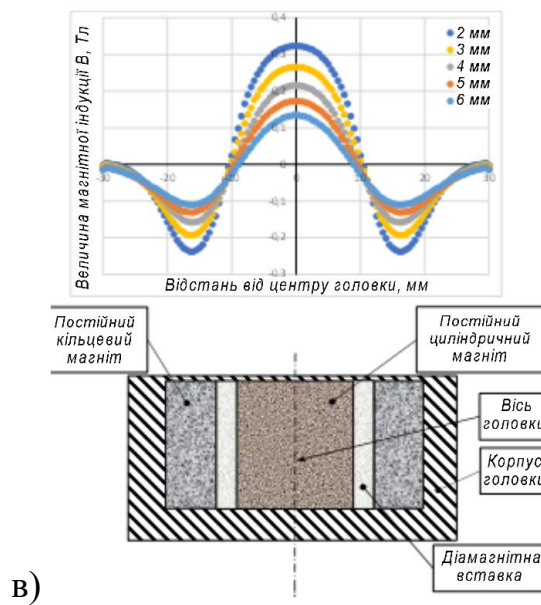
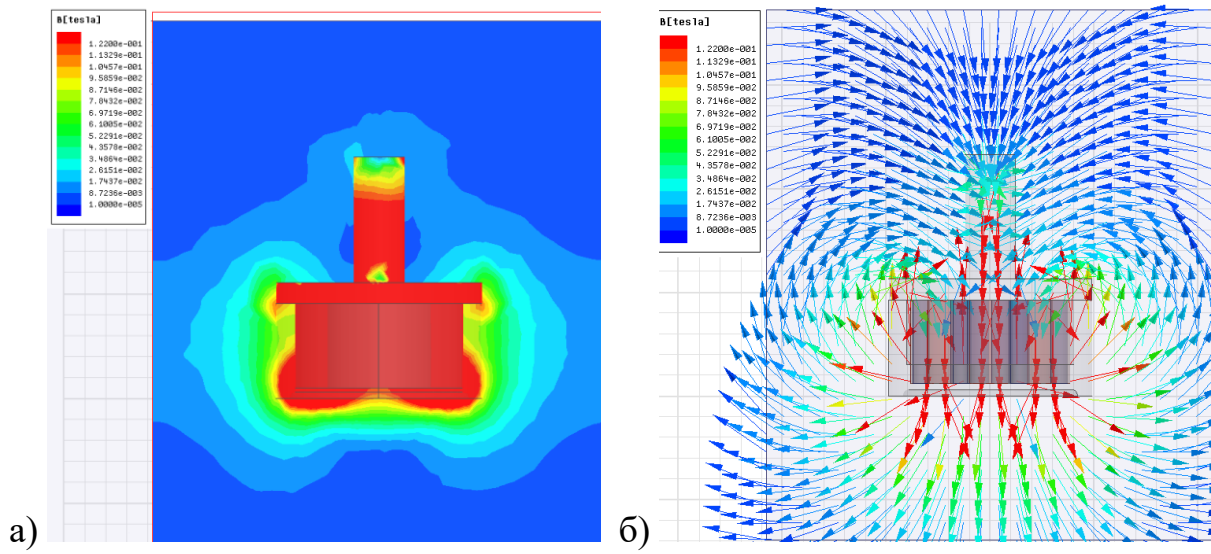
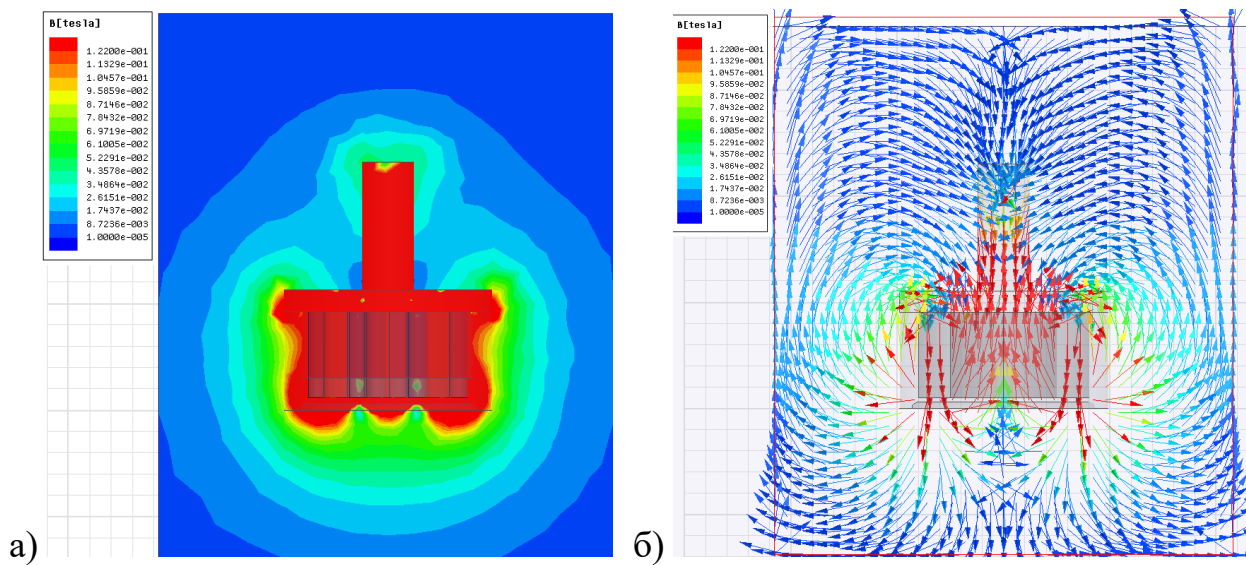
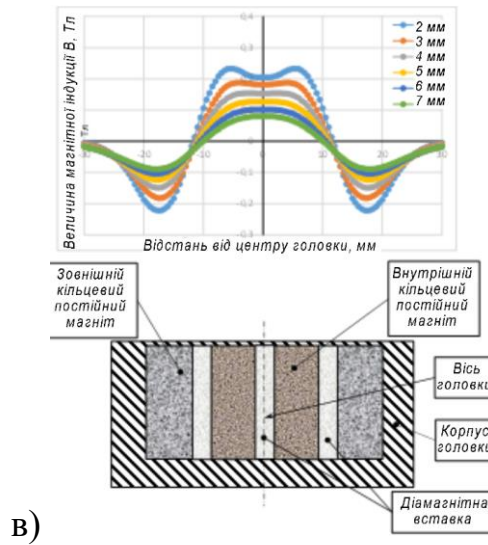


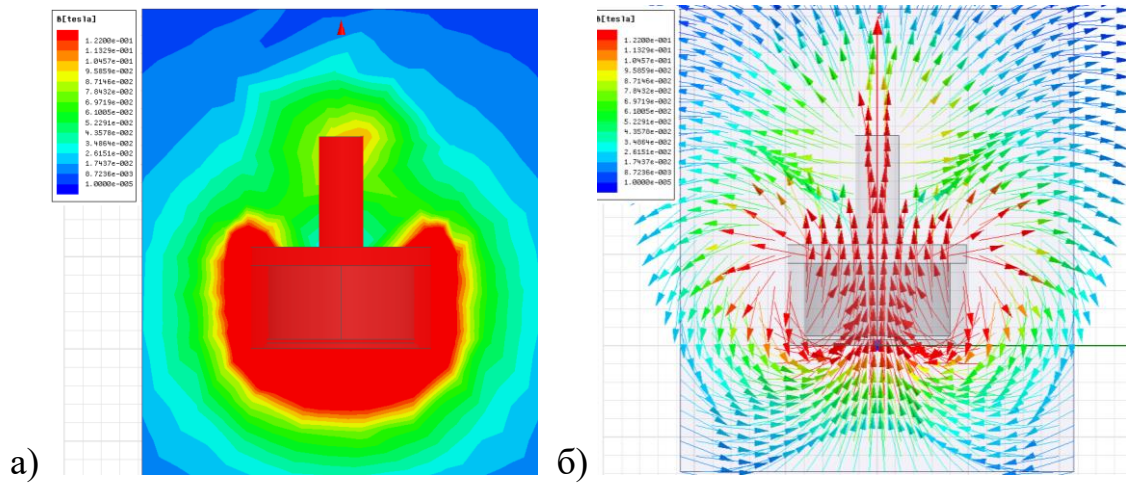
Рис. 2.14 Результати вимірів та моделювання магнітної індукції для індуктора «щітка-напівтор»





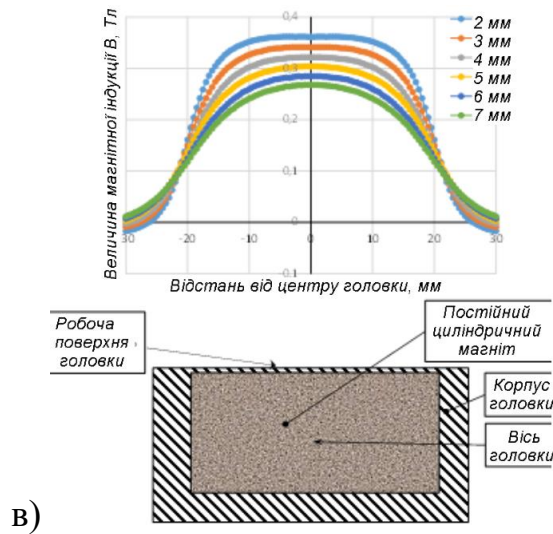
в)

Рис. 2.15 Результати вимірів та моделювання магнітної індукції для індуктора «напівтор»



а)

б)



в)

Рис. 2.16 Результати вимірів та моделювання магнітної індукції для індуктора «щітка»

Із результатів вимірювань та моделювання в програмному забезпеченні робимо висновок, що Конструкція з одним великим магнітом може бути кращою для магнітно-активованих обробок (МАО) порівняно із компонуванням із множиною циліндричних магнітів з кількох причин:

1. Однорідність магнітного поля

Мономагнітні конструкції забезпечують більш стабільне та однорідне магнітне поле. Коли використовується один великий магніт, можна точно контролювати його характеристики, такі як сила та напрямок поля, що забезпечує рівномірний вплив на матеріал та стійкість формування МАІ.

У полімагнітних конструкціях магнітні поля можуть накладатися та взаємодіяти один з одним, що може призвести до неоднорідності. Наприклад, поле від одного магніту може частково компенсувати або посилювати поле від іншого, створюючи неоднакові умови для обробки в різних точках.

2. Зниження складності конструкції

Конструкція з одним великим магнітом зазвичай простіші в реалізації та налаштуванні, оскільки не потрібно забезпечувати взаємодію кількох магнітів або складні схеми для їхнього позиціонування та керування. Це дозволяє спростити конструкцію обладнання та знизити витрати на його виготовлення та обслуговування. Полімагнітні конструкції можуть вимагати складних механізмів для точного розташування магнітів, їх координування та налаштування, що підвищує складність конструкції та вартість.

3. Енергоефективність.

Один великий магніт дозволяє забезпечити більш ефективне використання магнітного поля. При використанні одного магніту можна оптимізувати його розмір та форму, щоб максимально збільшити магнітне поле в оброблюваній зоні, зменшуючи втрати енергії. Полімагнітні конструкції індукторів можуть створювати локальні зони з сильними та слабкими магнітними полями, що може призвести до втрат енергії, знижуючи загальну ефективність процесу.

4. Простота в управлінні

У мономагнітних конструкціях процес управління зазвичай є більш зручним і точним, оскільки потрібно лише регулювати одне магнітне поле. Це дозволяє швидше та ефективніше налаштовувати параметри оброблення. У полімагнітних конструкціях необхідно синхронізувати роботу кількох магнітів, що може ускладнити контроль і точність процесу, збільшуючи ймовірність помилок або нестабільності в роботі.

5. Магнітна індукція та інтенсивність

Один великий магніт створює потужне і стабільне магнітне поле, яке рівномірно взаємодіє із МАП та оброблюваними поверхнями, що дозволяє досягти високої ефективності процесу зняття матеріалу. У полімагнітних конструкціях ефективність поля може бути знижена через різні геометрії полів, що можуть призвести до створення місць із меншим або більш нерівномірним полем, що негативно впливає на ефективність оброблення.

6. Менше ризику механічних проблем

Один великий магніт зменшує кількість рухомих частин, що означає менший ризик механічних проблем, таких як відхилення магнітів, тріщини, зношення компонентів, і забезпечує більш стабільну роботу обладнання. Полімагнітні конструкції можуть включати рухомі частини для налаштування магнітів, що підвищує ризик їх пошкодження або збоїв у роботі.

Підсумок

Конструкція з одним великим магнітом є кращою для МАО завдяки більшій однорідності поля, ефективності, простоті управління, меншій складності та низьким ризикам механічних збоїв. Вона дозволяє досягти стабільніших та прогнозованих результатів, що є важливим для забезпечення високої якості оброблення та ефективності технологічного процесу.

2.5 Підготовка зразків та вимірювання параметрів обробленого поверхневого шару

2.5.1 Вимірювання величини деформації зразка та напружень у поверхневому шарі

Було виготовлено зразки у вигляді тонких пластинок із вуглецевої інструментальної сталі У9, які були механічно очищені від поверхневих забруднень та нагару, що утворились внаслідок виконання термічного оброблення (відпалу).

Відпал проводили із метою забезпечення сталості результатів проведених експериментальних досліджень за рахунок наступних факторів впливу термічного оброблення на дослідні зразки:

Зниження внутрішнього напруження матеріалу: Відпал допомагає знімає або суттєво зменшує залишкові напруження в матеріалі, що виникають після попередніх способів оброблення, таких як зварювання, механічна обробка або кування.

Мікроструктурні зміни: Процес відпалу сприяє зміні структури матеріалу, наприклад, поліпшенню його зернистості. Це дозволяє зробити матеріал більш однорідним та стабільним.

Термічне вирівнювання складу: Відпал може застосовуватися для вирівнювання хімічного складу в матеріалі, що дозволяє зменшити неоднорідність матеріалу та покращити його властивості.

Видалення поверхневого шару проводилось методом плоского шліфування на верстаті мод. 3Г71М. Після чого зразки фіксувалися в спеціальному технологічному пристрої, виготовленому з ферромагнітного матеріалу, за допомогою двох гвинтів (рис. 2.17).



Рис. 2.17 Пристосування для фіксації дослідних зразків для проведення МАО [45, 46]

Оброблення зразків виконувалось на широко-універсальному інструментальному верстаті моделі 6Б75ВФ1. Враховуючи попередні дослідження [63-68] оброблення виконувалось зі швидкістю обертання 900 об/хв та подачею 10 мм/хв із варіацією величини робочих зазорів в межах від 3-х до 5-и мм. Оброблення проводили індуктором із МАІ типу «щітка» із використанням асфолу у якості ЗОТС. В якості абразивних матеріалів було застосовано наступні порошки: осколковий рівновісний Феромап 630/400 мкм, округлий нерівновісний Царамам 630/400 мкм та округлий рівновісний S330 1200/900 мкм. Такий вибір порошоків був обумовлений необхідністю дослідити вплив порошоків різної геометричної форми та розміру фракції на процес формування параметрів поверхневого шару при проведенні МАО в умовах малих магнітних зазорів.

Вимірювання величини деформації зразків внаслідок впливу МАО

Вимірювання величини деформації зразків, що виражається у прогині зразків, проводилось оптичним методом за допомогою інструментального мікроскопу. Зразки після оброблення фіксувались на плоско-паралельній шліфованій пластині за допомогою струбцини, після чого здійснювався вимір відхилення від паралельності зразка відносно пластини. Для кожного зразка прогин вимірювався чотири рази: по два вимірювання на кожному з торців. Це виключає

можливі спотворення результатів за рахунок нерівності зразка в поперечному напрямку. В подальшому обчислювали середнє арифметичне значення з двох вимірів на кожному торці. Після чого вираховували середнє арифметичне для двох торців, яке використовували в подальших розрахунках. Схему вимірювання можна побачити на рис. 2.18.

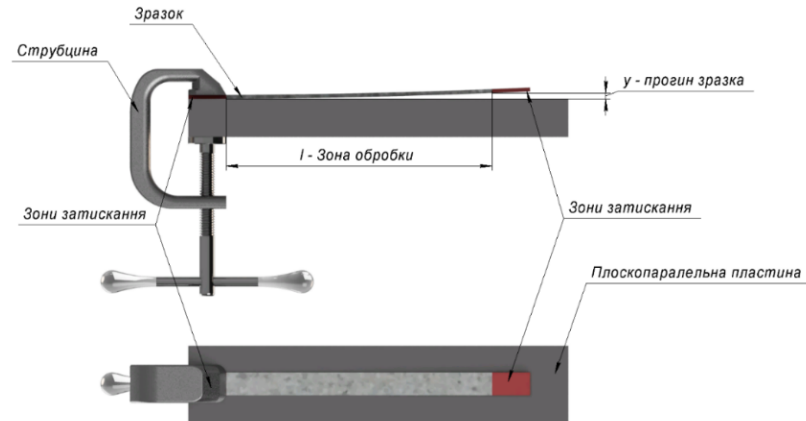


Рис. 2.18 Схема вимірювання деформації зразка

Для зручності в подальшому розрахунки внутрішніх напружень виконували із міркувань того, що ми маємо справу зі зразком у вигляді консольної балки [69] довжиною l навантаженої рівномірно розподіленим навантаженням q , яке імітує дію магнітно-абразивного інструменту в процесі МАО.

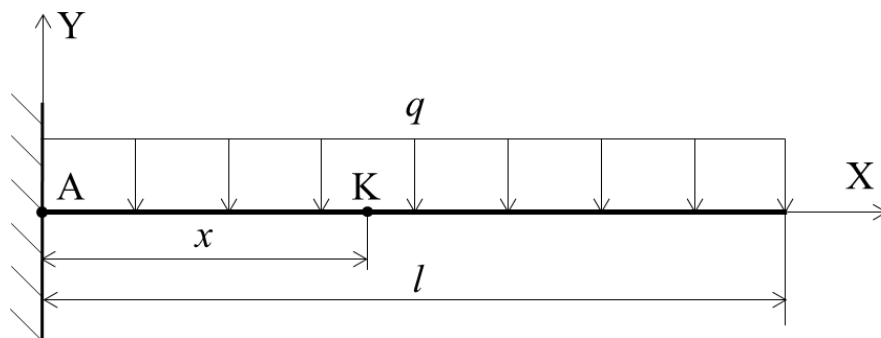


Рис. 2.19 Розрахункова модель

В защемленні виникає реактивна сила $R_A = ql$ і реактивний момент $M_A = ql^2/2$. Вигинаючий момент в довільному поперечному перерізі балки – наприклад деякої точки К, що розташована на відстані x від защемлення можна визначити як:

$$M(x) = -\frac{ql^2}{2} + qlx + \frac{qx^2}{2}; \quad (2.3)$$

Для того щоб знайти функціональну залежність прогину балки потрібно розв'язати диференціальне рівняння, яке описує лінію вигину балки:

$$y''(x) = \frac{M(x)}{EI_x}; \quad (2.4)$$

Виконавши подвійне інтегрування обох частин рівняння отримаємо:

$$y(x) = \frac{1}{EI_x} \left(\frac{qlx^3}{6} - \frac{qx^4}{24} + c_1x + c_2 \right); \quad (2.5)$$

Для визначення сталих інтегрування c_1 і c_2 будемо враховувати, що лівий кінець балки жорстко закріплено, тобто кут повороту і прогин в защемленні дорівнюють нулю. Звідки прогин на вільному кінці балки буде визначатися як:

$$y(l) = \frac{ql^4}{8EI_x}; \rightarrow q = \frac{8y_{max}EI_x}{l^4}; \quad (2.6)$$

Знаючи значення згинального моменту виразимо розподілене навантаження у вигляді:

$$M(l) = \frac{ql^2}{2}; \quad (2.7)$$

$$q = \frac{2M}{l^2}; \quad (2.7)$$

З залежності нормальних напружень при згині балки $\sigma = \frac{M}{W_x}$, враховуючи (2.7) і (2.8) і те, що момент інерції та моменту опору при згині для прямокутного перерізу визначаються як: $I_x = \frac{bh^3}{12}$ і $W_x = \frac{bh^2}{6}$ остаточно для визначення залишкових напружень по величині прогину зразка отримаємо наступну формулу:

$$\sigma = \frac{2y_{max}Eh}{l^2}. \quad (2.9)$$

Де: σ – напруження (МПа);

y_{max} – величина вигину зразка (мм);

E – модуль Юнга (ГПа);

h – товщина зразка (мм);

1 – довжина заготовки (мм).

2.5.2 Вимірювання поверхневої мікротвердості обробленого шару матеріалу зразків

Для визначення глибини розташування та товщини шару матеріалу, що змінив свої властивості внаслідок магнітно-абразивного оброблення було виміряно мікротвердість поверхні по глибині за допомогою мікротвердоміра ПМТ-3 рис. (2.20). - приладу для вимірювання мікротвердості матеріалів, який використовується для оцінки твердості поверхневих шарів або малих об'єктів, де застосування традиційних методів твердомірів неможливе через малі розміри або товщину матеріалу. Вимірювання засноване на методі призми Віккерса або Кнупа, що дозволяє вимірювати твердість матеріалів шляхом індентування поверхні за допомогою діамантової піраміди. Прилад призначений для вимірювання твердості в мікрооб'ємах, зокрема для дуже тонких або локальних поверхневих шарів, а також для визначення мікротвердості в матеріалах, де необхідно оцінити властивості на мікрорівні (наприклад, при перевірці поверхневого оброблення або дослідження складу сплавів). У процесі вимірювання ПМТ-3 виконує індентування поверхні матеріалу з використанням стандартної діамантової піраміди, після чого визначається розмір відбитка, що дозволяє обчислити величину твердості.



Рис. 2.20 Мікротвердомір ПМТ-3

Вимірювання мікротвердості виконували в наступному порядку:

1. Закріпити зразок паралельно робочій площині стола;
2. Помістити підходяще навантаження;
3. Обрати місце для уколу;
4. Плавню повернути робочий стіл проти годинникової стрілки до упору;
5. Плавню повернути рукоятку проти годинникової стрілки опустити шток так, щоб алмаз торкнувся поверхні досліджуваного зразка. Рукоятку повертати приблизно на 180° на протязі 10-15 с. Після необхідної витримки (5 с) під навантаженням повернути рукоятку в вихідне положення;
6. Виміряти діагональ відбитка за допомогою окуляра мікротвердоміру.

Значення твердості, що була отримана внаслідок оброблення розраховували за наступною формулою:

$$H = 1854 \cdot \frac{P}{C^2}; \quad (2.10)$$

Де, H – значення твердості, кг/мм²;

P – навантаження, г;

C – діагональ відбитка в мкм.

Для визначення ступеню зміцнення поверхневого шару матеріалу зразка внаслідок ударно-фрикційної взаємодії магнітно-абразивного порошку було виконано розрахунок коефіцієнту зміцнення за наступною формулою:

$$K = \frac{HV_{\text{ост}} - HV_{\text{поч}}}{HV_{\text{поч}}}; \quad (2.11)$$

Де, K – коефіцієнт зміцнення;

$HV_{\text{ост}}$ – значення мікротвердості остаточне;

$HV_{\text{поч}}$ - значення мікротвердості початкове.

Оптичні схеми вимірювання відбитків наведені на рис. 2.21.

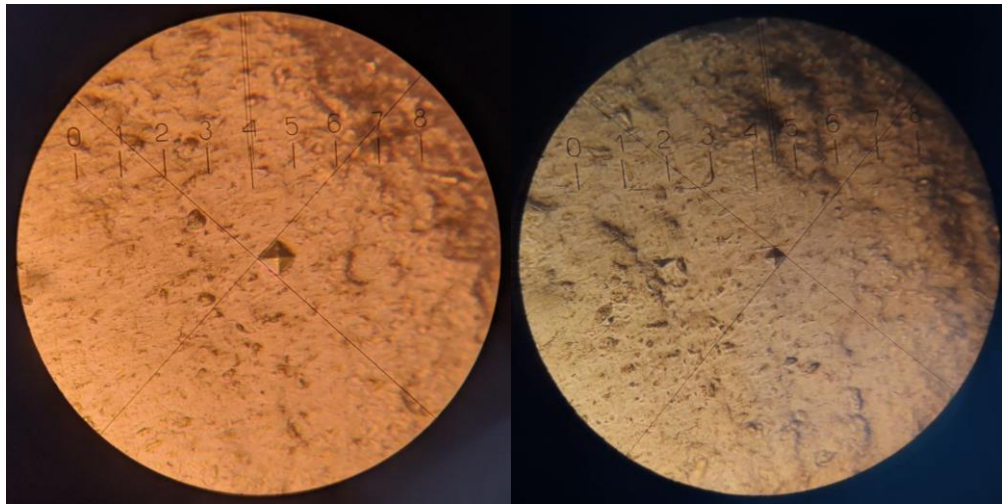


Рис. 2.21 Схеми вимірювання відбитків (вид в окулярі)

2.5.3 Обґрунтування вибору торцевої поверхні індуктора

Попередні дослідження показали, що найраціональнішою конструкцією робочої поверхні торцевого індуктора із МАІ типу «щітка» є поверхня, на якій нанесено 9–12 радіально орієнтованих виступів у формі трикутників. Використання таких головок дозволяє досягати ефективного формування шорсткості оброблених поверхонь з $Ra < 0,03$ мкм при початковій шорсткості Ra на рівні 0,8 мкм. Результати проектування та випробувань головок типу зірочка 12 прямих радіальних променів (рис.2.22), радіально розташовані 60 рівносторонніх пірамід (рис. 2.23), радіально розташовані 60 рівносторонніх прямих паралелепіпедів (рис. 2.24), радіально розташовані 6 криловидних виступів із обмежувальним обідком на периферії (рис. 2.25), зірочка із 18 прямих радіальних променів трикутного перерізу (рис. 2.26), зірочка 6 серповидних радіальних променів (рис. 2.27), зірочка 6 прямих радіальних променів (2.28), зірочка із 12 прямих радіальних променів трикутного перерізу (рис. 2.29) та радіально розташовані 60 циліндрів (рис. 2.30) наведені на рисунках нижче. Криві на рисунках відображають зміну значення шорсткості вздовж – синя крива та впоперек – червона крива, відносно напрямку оброблення фрезеруванням.

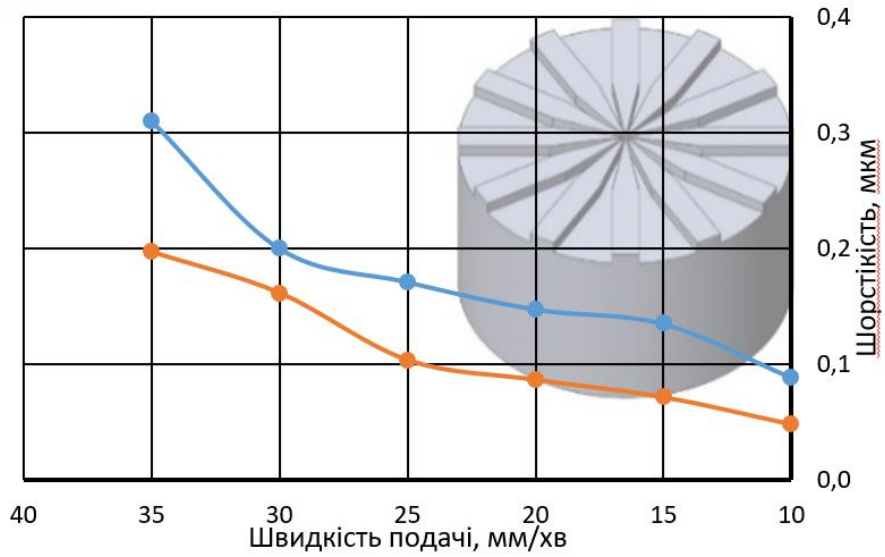


Рис. 2.22 Поверхня типу зірочка 12 прямих радіальних променів

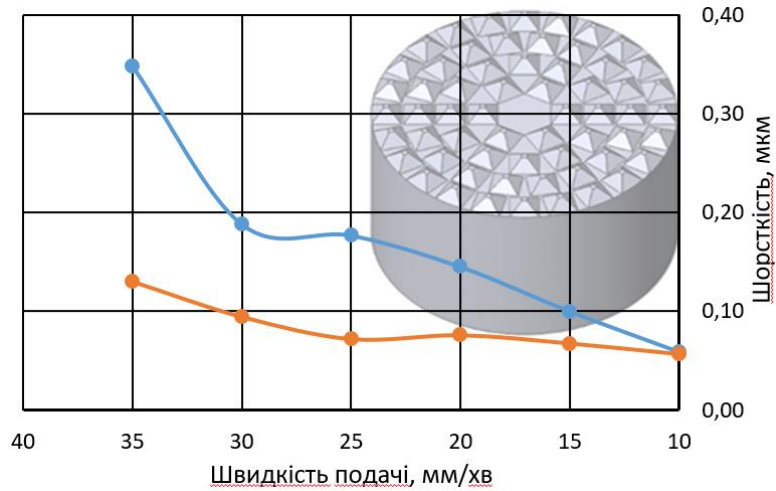


Рис. 2.23 Поверхня радіально розташовані 60 рівносторонніх пірамід

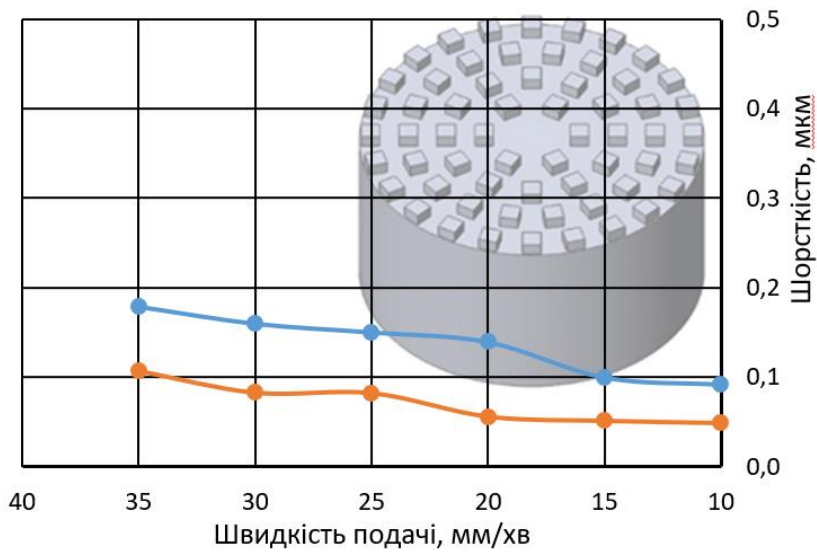


Рис. 2.24 Поверхня радіально розташовані 60 прямих рівносторонніх паралелепіпедів

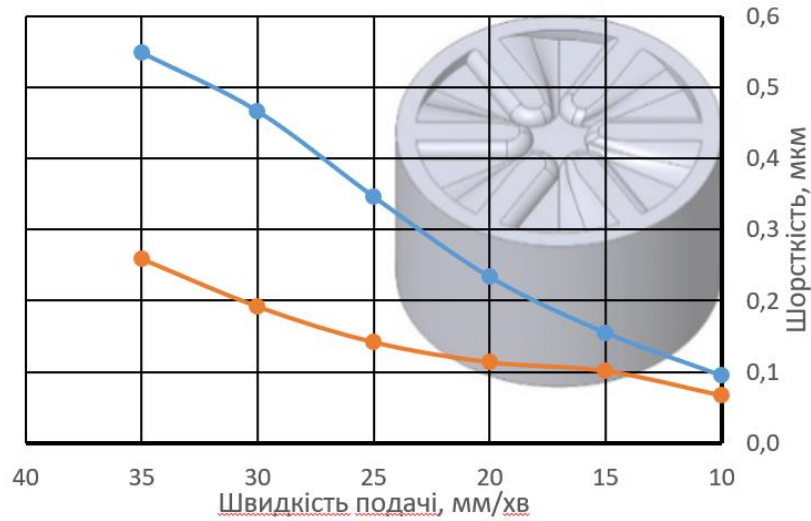


Рис. 2.25 Поверхня радіально розташовані 6 криловидних виступів з обідком на периферії

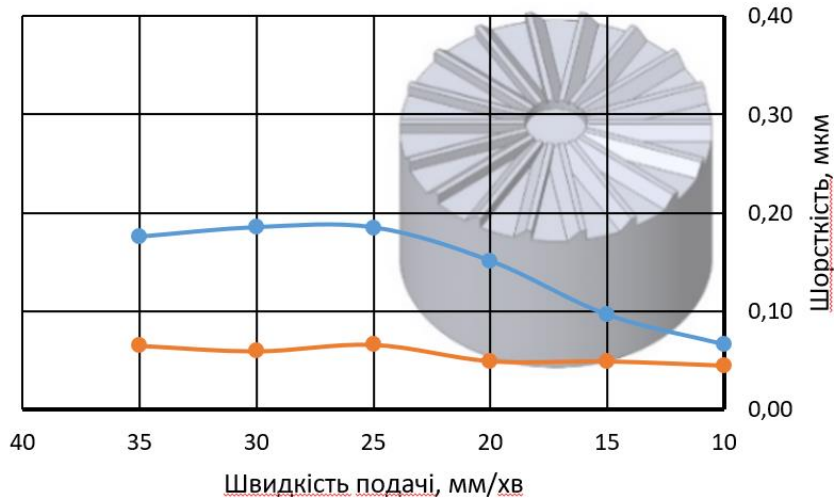


Рис. 2.26 Поверхня зірочка 18 прямих радіальних променів трикутного перерізу

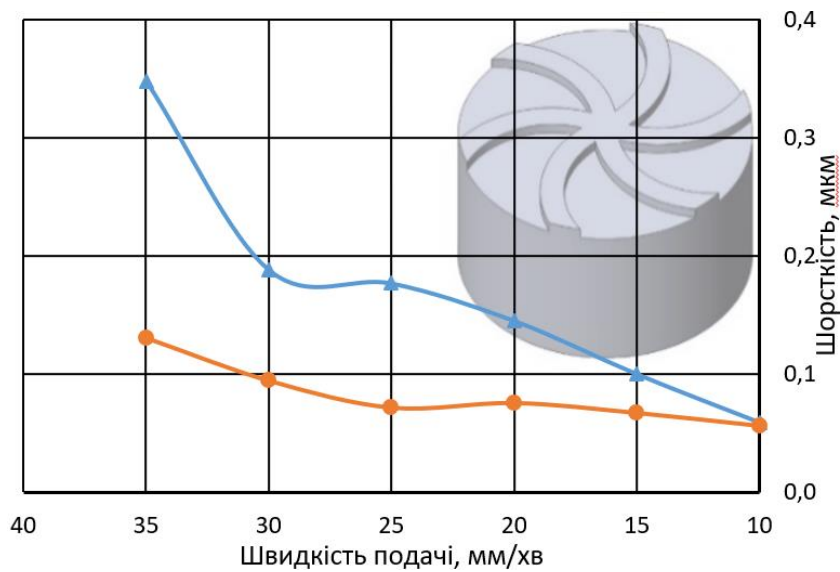


Рис. 2.27 Поверхня зірочка 6 серповидних радіальних променів

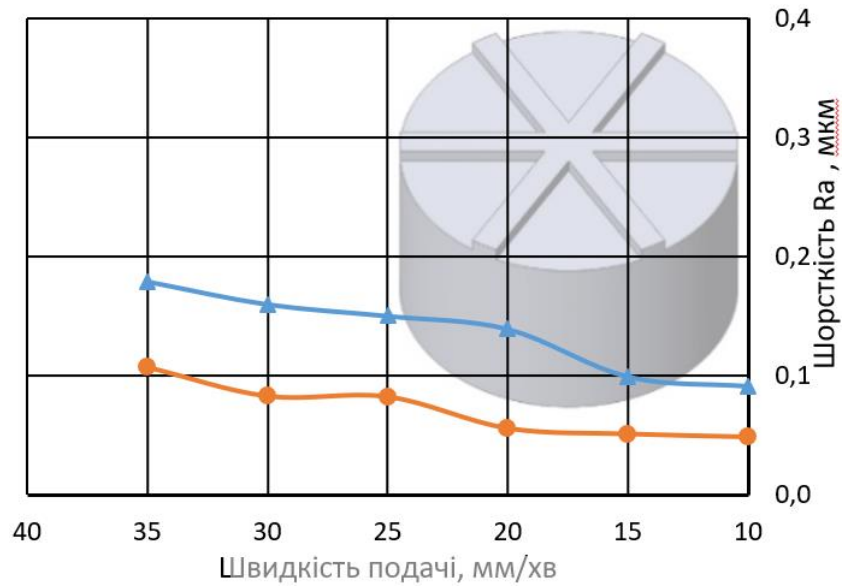


Рис. 2.28 Поверхня зірочка 6 прямих радіальних променів

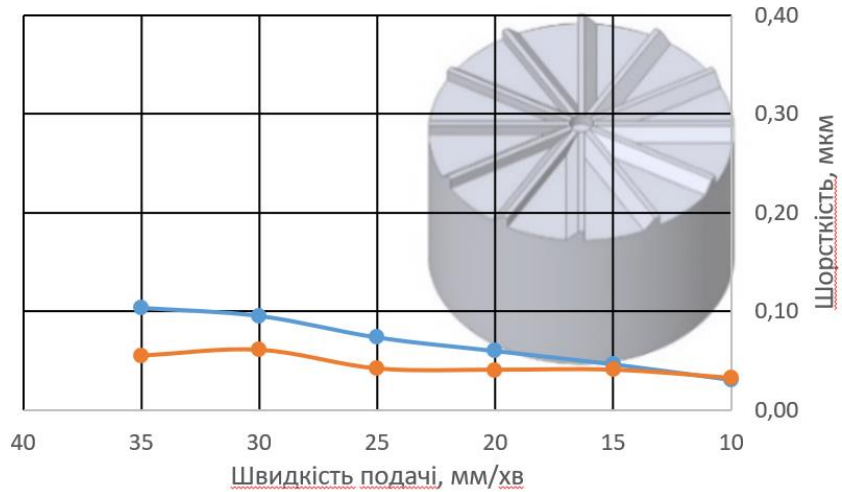


Рис. 2.29 Поверхня зірочка 12 прямих радіальних променів трикутного перерізу

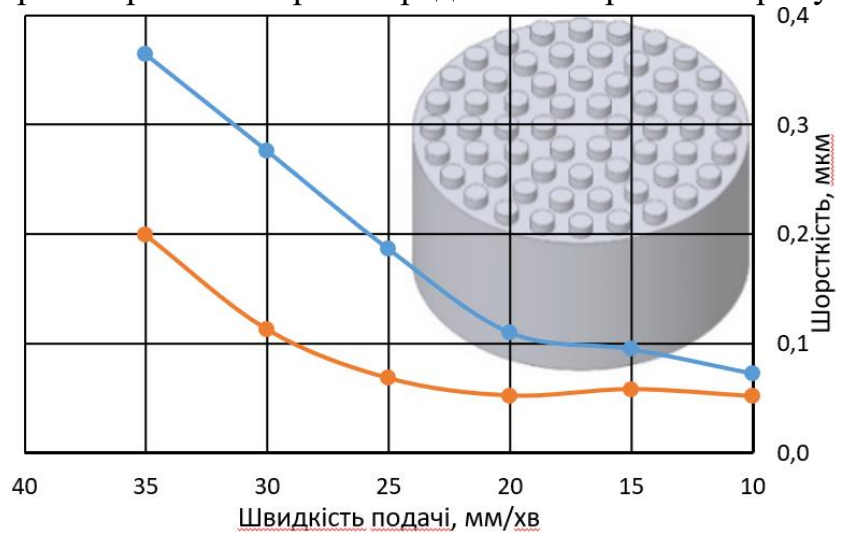


Рис. 2.30 – Поверхня радіально розташовані 60 циліндрів

Найменша шорсткість забезпечується при використанні індукторних насадок: зірочка 6 прямих радіальних променів, радіально розташовані 60

рівносторонніх пірамід, зірочка із прямими радіальними променями трикутного перерізу та конструкції із варіацією кількості променів.

Спільним для зазначених головок є низька величина відносної густини заповнення на вершинах виступів. Слід зазначити, що із зазначеної тенденції випадає насадка із шістьма радіальними променями. Позитивну роль має кількість радіально розташованих виступів. Показано, що наявність 6-18 радіально розташованих виступів забезпечує, навіть за швидкості подачі 35 мм/хв, досягнення параметра $Ra < 0,15$ мкм. Це пов'язано з особливостями формування МАІ на торцевій поверхні головки, коли радіальні виступи забезпечують умови, за яких швидкість переміщення частинок відносно поверхні, що обробляється, мінімально відрізняється від швидкості основного робочого руху головки – обертання навколо власної осі і при цьому не порушується безперервність контакту МАІ з оброблюваною поверхнею. Крім цього, перед кожним виступом формується стійка, квазістабільна зона із ущільненого магнітно-абразивного порошку – зона заклинювання, що сприяє підвищенню ефективності обробки.

Підтвердженням формування відносно стабільної зони заклинювання можуть бути результати, отримані на насадках з різними формами виступів, в той час як тільки виступи пірамідальної форми забезпечують відносно високі показники по обробці при малій величині щільності заповнення на вершинах виступів, але при цьому відносно стійко утримують у квазістабільному стані ущільнені скупчення абразивного порошку, які формують зони заклинювання. Необхідно відзначити і результати зміни параметрів мікропрофілю поверхні заготовок після МАО головкою з насадкою – зірочка з 6 серповидних радіальних променів. Отримані результати суттєво гірші, ніж при обробці головкою з прямими променями, що пов'язано з особливостями руху магнітно-абразивного порошку в зонах обробки та вимагає додаткових досліджень, пов'язаних з різною конфігурацією та розмірами радіально розташованих виступів.

РОЗДІЛ 3

ВПЛИВ МАО НА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТА МІКРОГЕОМЕТРИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБРОБЛЮВАНИХ ПОВЕРХОНЬ

Фінішна обробка площин феромагнітних деталей на стандартному металорізальному обладнанні вимагає використання спеціальних інструментів, які повинні зберігати свою геометричну форму, абразивну та поліруючу здатність протягом усього циклу обробки, а також ефективно видаляти матеріал, що видаляється, з зони різання. Для цього застосовуються абразивні інструменти з рухомими абразивними частками, що утримуються у підвішеному стані магнітним полем – так званою «віртуальною» зв'язкою. Такий інструмент, що формується під час обробки, називається магнітно-абразивним інструментом (MAI), і він має унікальні характеристики, що дозволяють ефективно обробляти важкооброблювані матеріали з високою продуктивністю та забезпечити ефективне тепловідведення із зони різання. Використання постійних високоенергійних неодимових магнітів у конструкціях технологічних пристроїв, що використовуються для створення такого інструменту у вигляді різних типів головок (кільцевих, торцевих і радіальних), дозволяє формувати «віртуальну» зв'язку без значних змін у конструкції та технології верстатів. Однак для правильного функціонування таких магнітних головок необхідно ретельно продумати їх конструкцію, включаючи геометрію робочих поверхонь, тип і форму магнітів, їх розташування в корпусі головок, а також наявність елементів для концентрації магнітного поля і особливості геометрії робочих поверхонь.

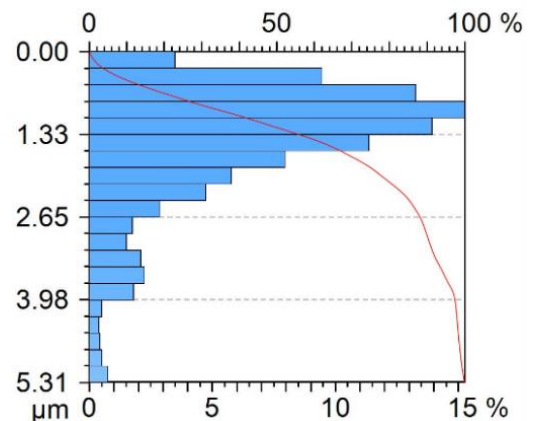
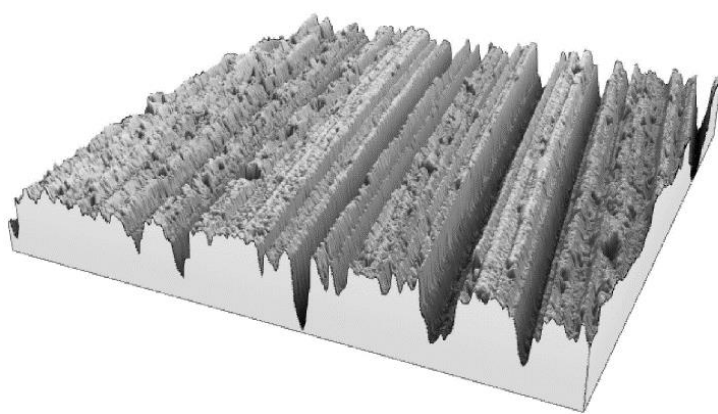
Подібні вимоги, до магнітних головок, формуються перш за все необхідністю дотримання та виконання в процесі їх експлуатації вимог, що є ключовими для проведення ефективного процесу магнітно-абразивної оброблення [26, 27, 63].

Аналіз досліджень виконаних попередниками в сфері фінішних методів оброблення плоских поверхонь довів доцільність використання магнітних головок торцевого типу [40, 46, 47].

Дослідженнями проведеними раніше розглянуто вплив форми робочих поверхонь магнітних головок, а також матеріалу магнітів, технологічних умов оброблення, було доведено, що найкращі результати мають місце при використанні порошків типу Феромап з уламковою формою частинок, отриманих методом розпилення з розплаву з наступним їх дробленням, розмелюванням та розподілом методом сепарації на фракції. Показано, що тип МАІ, що формується на торцевій робочій поверхні магнітної головки визначає раціональні умови обробки, необхідні для досягнення мінімальної шорсткості. Тому одним із впливових факторів на параметричний стан поверхонь оброблюваних деталей, окрім вище зазначених чинників, є структурний склад МАП, що формується на робочих поверхнях магнітно-абразивного інструменту.

3.1 Вплив величини робочого зазору на параметри шорсткості та характеристики опорної поверхні деталей

Початковим етапом досліджень було визначення впливу величини магнітного зазору на вихідну після МАО шорсткість, висотні показники виступів та западин. Отримані результати (рис. 3.1) демонструють, що найменші значення параметрів формуються при обробці з величиною робочого зазору 2 мм.



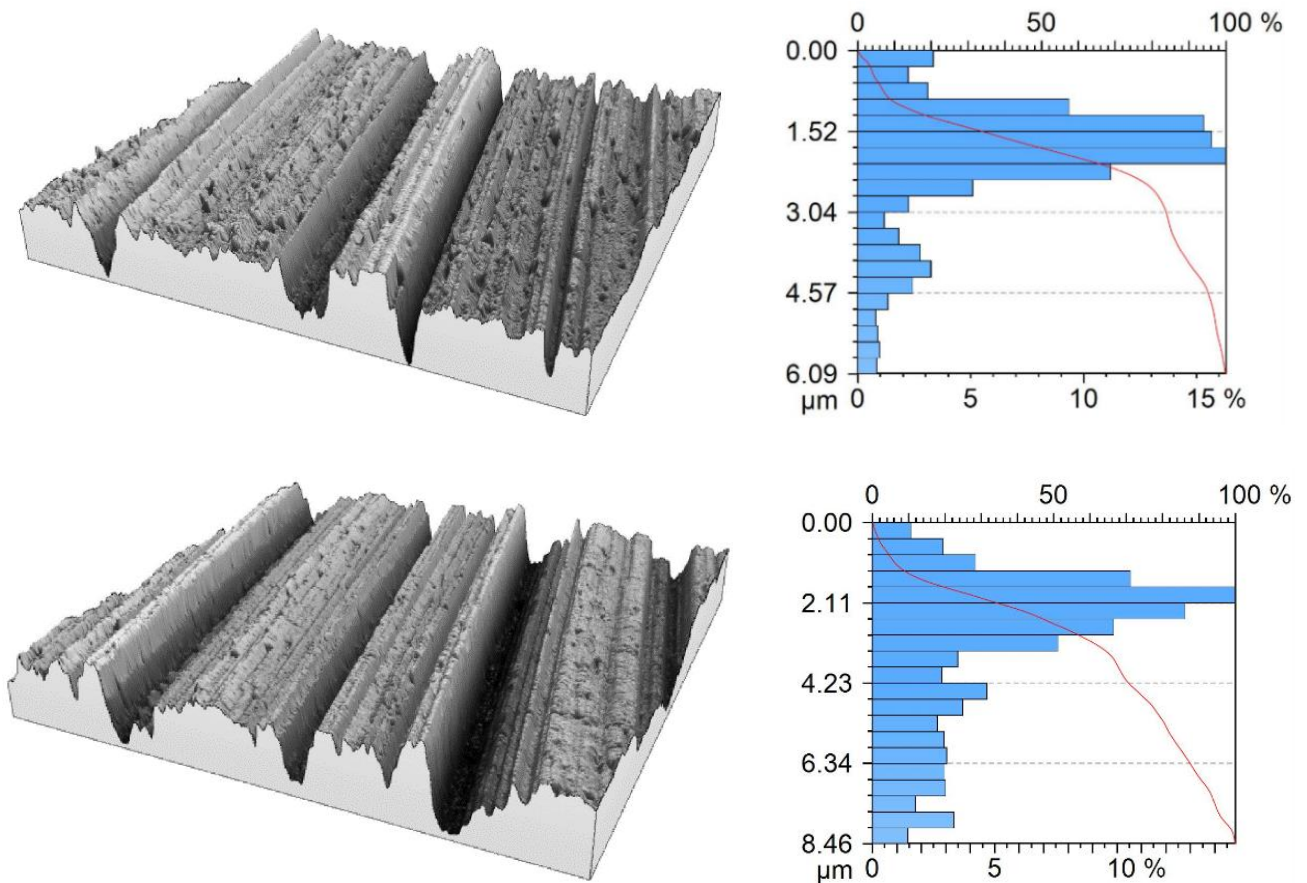


Рис. 3.1 Тривимірне зображення, частотний розподіл висот мікронерівностей та величина опорної поверхні до МАО

Відзначимо, що зазначені вище дані підтверджують, результати досліджень проведених в [17, 26]. Варто зазначити, що при значеннях величини робочого зазору в діапазоні 2 ... 3 мм виконується активна обробка впадин мікропрофілю та зменшення хвилястості поверхні, що формується внаслідок верстатної обробки торцевим фрезеруванням. Зовнішній вигляд (тривимірне зображення), частотний розподіл значень висот мікронерівностей і залежності зміни опорної поверхні профілю після оброблення МАО з величиною робочих зазорів від 1,5 мм до 5 мм представлені на рис. 3.2-3.5.

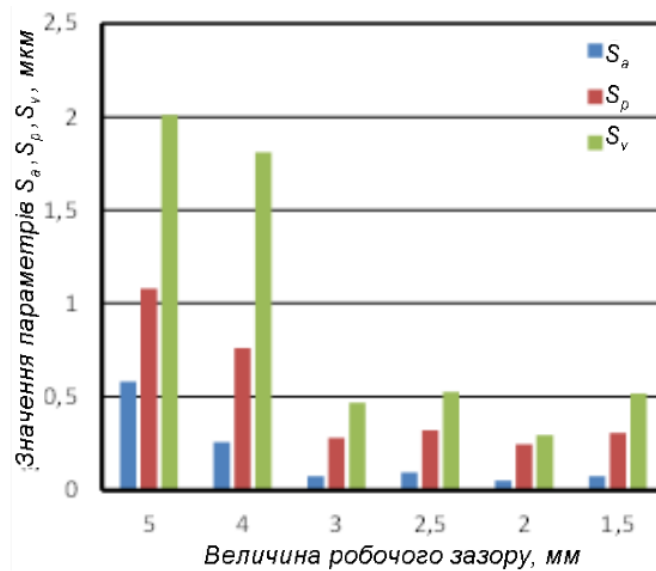


Рис. 3.2 Гістограма зміни величин параметрі мікропрофілю поверхні S_a , S_p , S_v в залежності від величини робочого зазору під час МАО

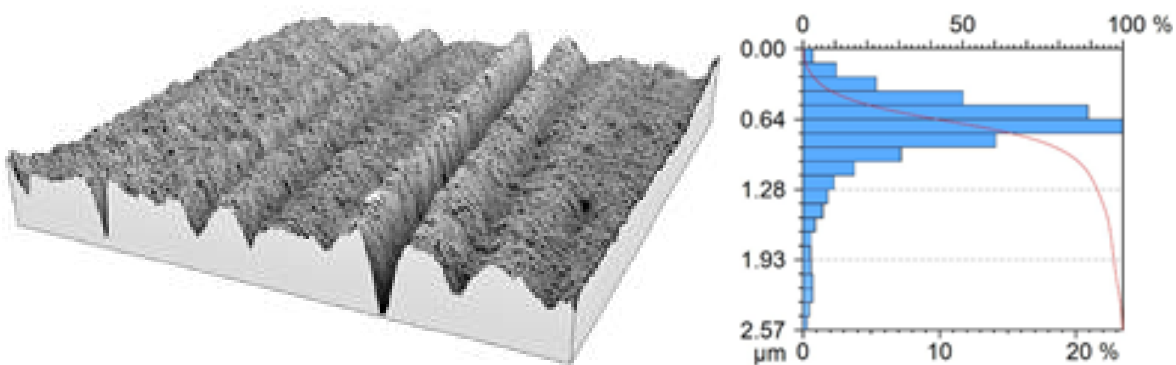


Рис. 3.3 Тривимірне зображення, частотний розподіл висот мікронерівностей та величина опорної поверхні профілю отриманого після МАО з величиною робочого зазору – 4 мм

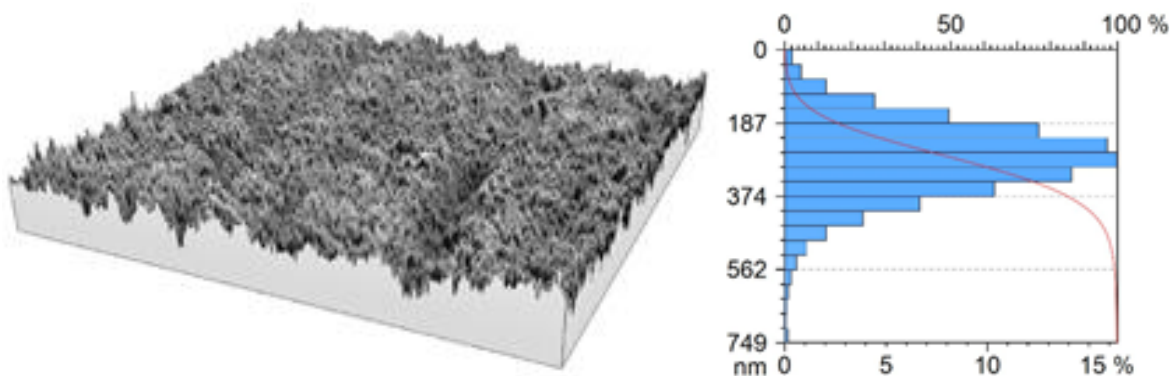


Рис. 3.4 Тривимірне зображення, частотний розподіл висот мікронерівностей та величина опорної поверхні профілю отриманого після МАО з величиною робочого зазору – 4 мм

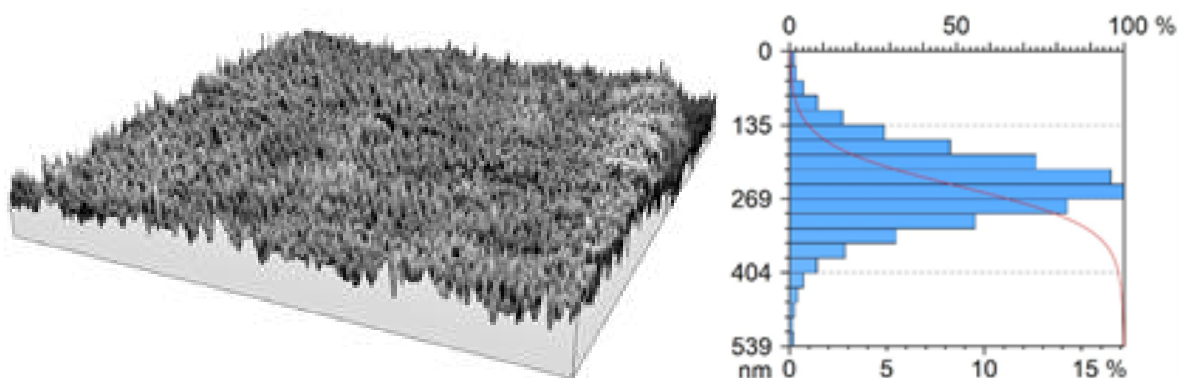


Рис. 3.5 – Тривимірне зображення, частотний розподіл висот мікронерівностей та величина опорної поверхні профілю отриманого після МАО з величиною робочого зазору – 4 мм

На основі отриманих даних, а також візуальних спостережень під час експериментальних заходів варто відмітити, що в залежності від величини фракції обраного магнітно-абразивного порошку існують раціональні значення магнітних зазорів, що відповідають певній величині фракції порошку, а також виключають шаржування – дефект поверхневого шару, що виникає внаслідок проникання та закріплення абразивних часток в поверхневому шарі оброблюваного матеріалу. За величини зазору менше ніж 1,5 мм відбувається процес активного видалення матеріалу, але при цьому спостерігаються часті випадки шаржування. При проведенні МАО із магнітними зазорами понад 5 мм оброблення не відбувається внаслідок недостатньої абразивної та магнітної взаємодії МАІ та оброблюваної поверхні. В більшості випадків раціональним значенням робочого зазору для випробуваних МАП становить близько 3-х мм.

3.2 Вплив швидкості обертання та подачі на параметри шорсткості поверхні деталей

Аналіз впливу швидкості обертання індуктора на параметри S_a , S_p , S_v був виконаний за сталої величини магнітного зазору – 3 мм та подачі індуктора – 10 мм / хв (рис. 3.6). Встановлено, що найліпші значення зазначених параметрів отримуються при виконанні МАО зі швидкостями обертання 500 ... 1000 об / хв. Збільшення швидкості обертання індуктора понад 1000 об / хв призводить до

порушення механізму взаємодії елементів МАІ із оброблюваною поверхнею – відбувається активне просковзування та проворот частинок ферроабразивного порошку відносно оброблюваної поверхні, що не забезпечує сприятливих умов для протікання процесів полірування та мікрорізання. Відзначимо, що швидкості обертання індуктора, при яких виконується активний поворот частинок в зоні контакту МАІ із поверхнею зразка збігаються з результатами, наведеними в [18] при дослідженні магнітно-реологічних характеристик МАІ. При значеннях швидкості обертання понад 1000 об / хв, МАІ не встигає відновлювати свою форму у магнітному полі, а й відповідно і не виконує активного та ефективного видалення матеріалу.

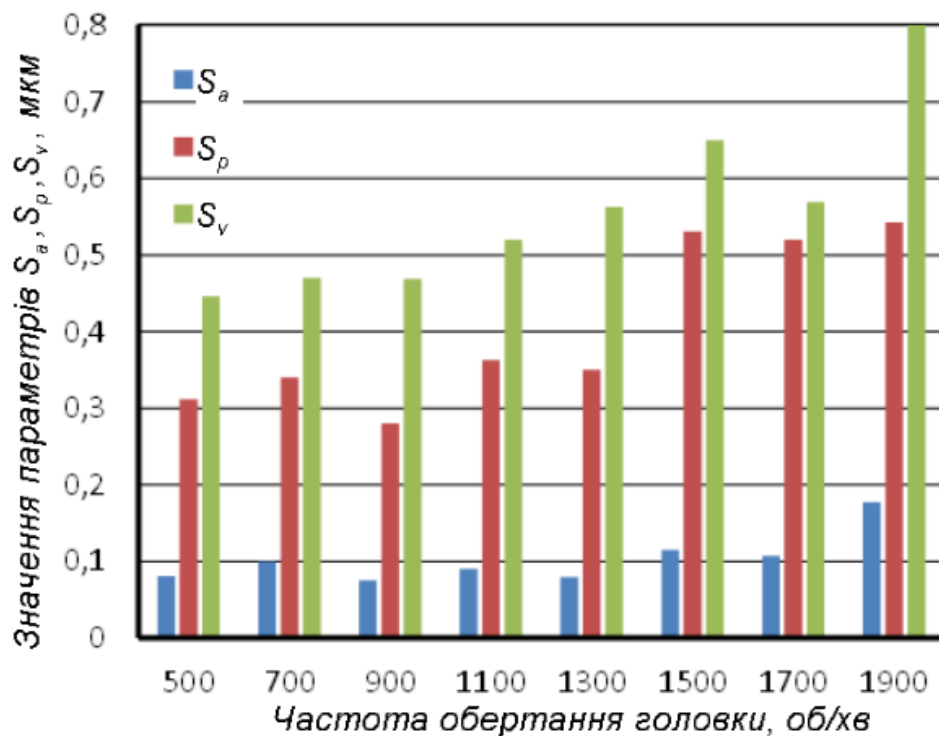


Рис. 3.6 – Гістограма зміни величини параметрів мікропрофілю S_a , S_p , S_v в залежності від частоти обертання індуктора

Дослідження впливу швидкості подачі головки при проведенні МАО демонструють, що при значеннях швидкостях подачі 20, 30 і 50 мм / хв. Відбувається переважне диспергування вершин мікронерівностей шорсткої поверхні без активної обробки западин. При швидкостях подачі 5-15 мм / хв виконується повне розполіровування мікропрофілю із активним видаленням

елементів спадковості обробки, отриманої внаслідок оброблення фрезеруванням. Характер зменшення висоти мікронерівностей і окремих елементів хвилястості наведено на рис. 3.7

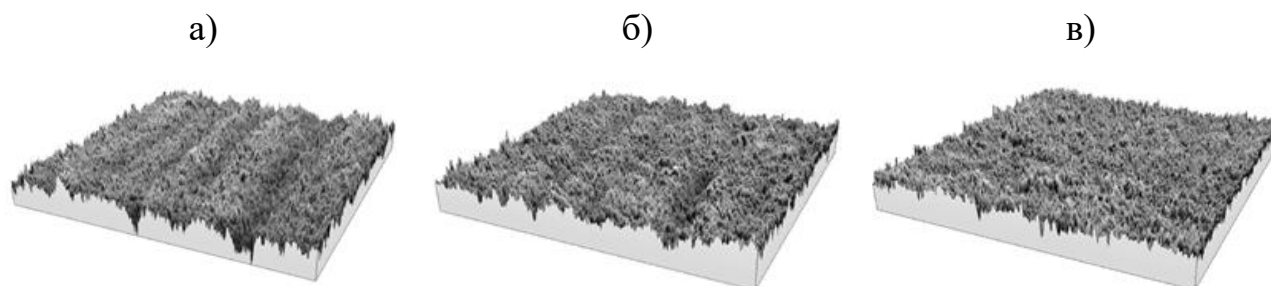


Рис. 3.7 – 3D зображення поверхні після МАО із різною швидкістю подачі робочої головки: а) – 15 мм/хв, б) – 10 мм/хв., в) – 5 мм/хв.– (в).

Зміна параметрів S_a , S_p , S_v при різних швидкостях подачі наведені на рис. 3.8

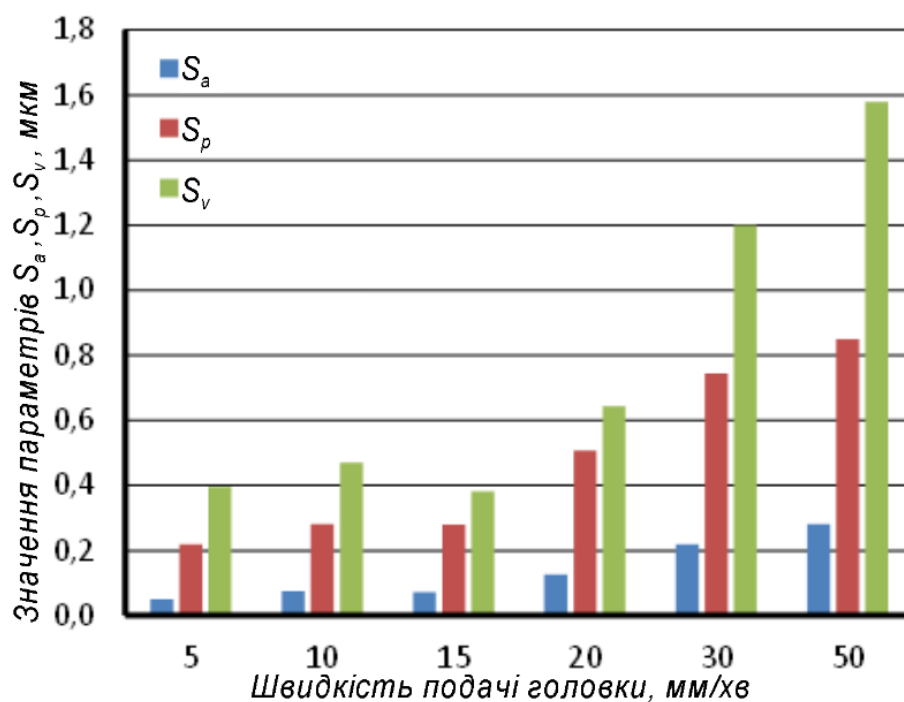


Рис. 3.8 – Гістограма зміни величини параметрів мікропрофілю S_a , S_p , S_v в залежності від швидкості подачі торцевих головок

При співставленні отриманих результатів з даними зміни параметрів S_a , S_p , S_v , отриманими при МАО індукторами із МАІ типу «щітка», «напівтор» та їх комбінації свідчить про те, що для всіх трьох типів індукторів рівень шорсткості,

що досягається після МАО практично ідентичний, відмінність полягає у тому, що процес МАО головками типу «щітка» виконується із підвищеною продуктивністю особливо з точки зору зниження хвилястості і окремих елементів спадковості обробки, яка визначається технологічними параметрами оброблення, таких як, глибина і величина подачі при фрезеруванні.

Раціональним значенням для проведення подальших експериментальних заходів є швидкість подачі індуктора в межах 10-15 мм/хв, так як при таких значеннях забезпечується рівномірне оброблення поверхні, забезпечуються найменші значення параметрів шорсткості, а машинний час при цьому є мінімальним.

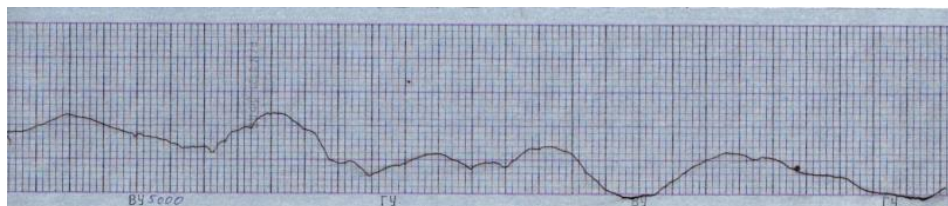
3.3 Вплив магнітно-абразивного оброблення на фізико-механічні параметри поверхневого шару обробленого матеріалу

3.3.1 Поверхнева мікротвердість та глибина зміцненого шару обробленого матеріалу

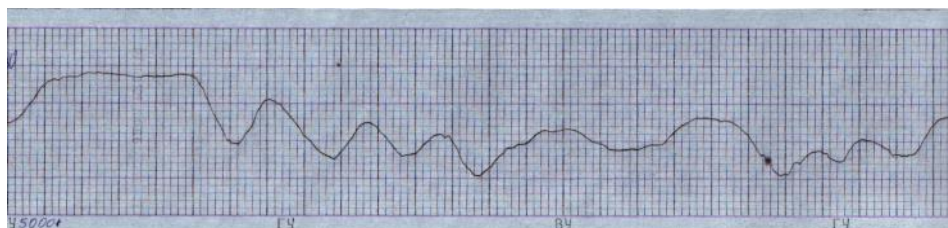
Для МАО використовували магнітно-абразивні порошки виду: осколковий рівновісний Феромап 630/400 мкм, округлий рівновісний S330 1200/900 мкм, округлий нерівновісний Царамам 630/400 мкм. В результаті процесу МАО зразків різними магнітно-абразивними порошками було отримано поверхні, профілограми яких наведено на рис. 3.9. Зовнішній вигляд поверхні зразків наведено на рис. 3.10.



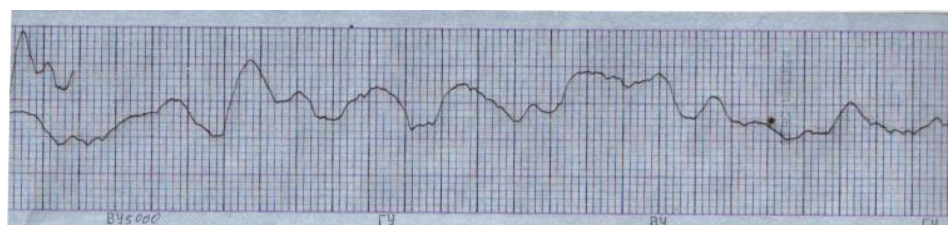
До МАО



МАО порошком
S330 1200/900
МКМ



МАО порошком
Феромап 630/400
МКМ



МАО порошком
Царамам 630/400
МКМ

Рис. 3.9 – Профілограми поверхонь зразків після оброблення різними порошками. ГЗ 200, ВЗ 5000

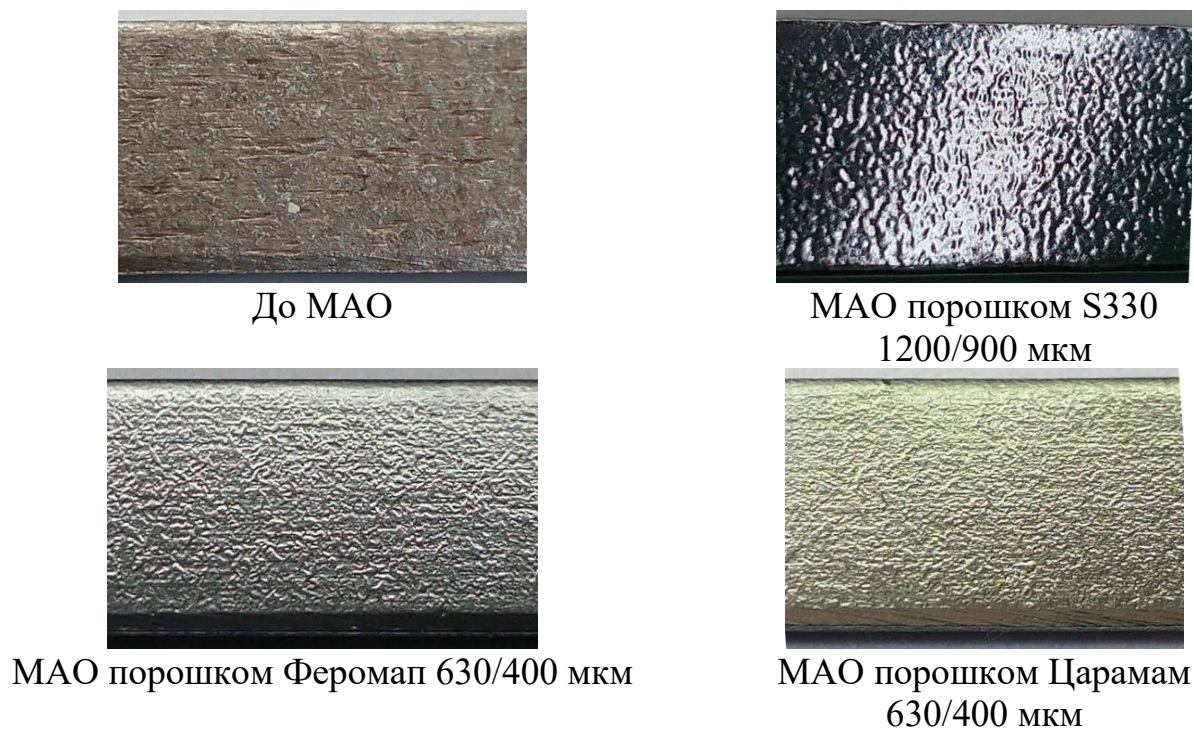


Рис. 3.10 – Зовнішній вигляд поверхонь зразків після оброблення

Аналіз наведених профілограм поверхонь і їх зовнішній вигляд свідчать про те, що під час виконання процесу МАО виконується не тільки вигладжування поверхні, а і пластичне деформування поверхневого шару. При чому характер формування вигладженого мікрорельєфу поверхні суттєво залежить від розмірів і форми частинок магнітно-абразивного порошку. При використанні порошку S330 із формою зерен, що практично є сферою формою радіуси западин на профілограмах найбільші, в той час як для поверхонь оброблених нерівновісним округлим порошком Царамам – вони найменші і відповідають величині радіусів округлення різальних кромek окремих зерен, наведених в [31]. Зміна мікрогеометрії поверхні зразків після МАО була незначною, що пояснюється з вибраними режимами оброблення, які не є раціональними для забезпечення найбільшої поліруючої здатності і вибрані таким чином, щоб забезпечити максимальний ударно-фрикційний вплив на поверхневий шар зразків та відповідно на зміну фізико-механічних характеристик оброблених поверхонь.

Було виконано вимірювання поверхневої твердості зразків до і після МАО. Вимірювання виконували на мікротвердомірі ПМТ-3 при навантаженнях на

індентор 0,3, 0,5 та 1 Н. Результати вимірювань і розрахована величина ступеню наклепу поверхневого шару наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Поверхнева твердість зразків після МАО

Порошок	Робочий зазор h, мм	Навантаження індентора, Н	HV _{кін} , ГПа	Ступінь наклепу, %	Середня величина наклепу, %	Глибина, мкм
Феромап 630/400 мкм	3	0,3	1,34	8	18	3 – 3,4
		0,5	1,49	20		3,6 – 4
		1	1,56	26		4,9 – 5,4
	3,5	0,3	1,3	14	27	3 – 3,4
		0,5	1,45	27		3,6 – 4,1
		1	1,58	39		4,9 – 5,4
	4	0,3	1,35	12	21	2,9 – 3,1
		0,5	1,41	15		2,6 – 3,9
		1	1,67	36		4,8 – 5,4
	5	0,3	1,33	25	39	2,9 – 3,5
		0,5	1,5	41		3,6 – 4,3
		1	1,61	52		4,9 – 5,5
Царамам 630/400 мкм	4	0,3	1,2	20	33	3,1 – 3,5
		0,5	1,34	26		3,8 – 4,9
		1	1,52	52		5 – 5,7
	4,5	0,3	1,57	15	12	2,7 – 2,8
		0,5	1,89	10		3,2 – 3,6
		1	1,61	10		4,9
	5	0,3	1,47	25	25	2,8 – 3,2
		0,5	1,49	24		3,6 – 4
		1	1,52	26		5 – 5,4
S330 1200/900 мкм	3	0,3	1,18	16	20	3,1 – 3,4
		0,5	1,53	21		2,5 – 3,9
		1	1,58	24		4,9 – 5,5
	4	0,3	1,33	13	21	2,9 – 3,2
		0,5	1,44	20		3,6 – 4
		1	1,57	30		4,9 – 5,3
	5	0,3	1,38	25	29	2,9 – 3,2
		0,5	1,47	30		3,6 – 4,1
		1	1,52	32		5,0 – 5,4

Показано, що найбільше значення збільшення ступеню наклепу має місце на глибині 5–5,5 мкм. Відзначимо, що зростання ступеню наклепу більше 35% відбувається після МАО зразків порошками з найменшими радіусами округлення різальних кромek – таких як Феромап – 30–60 мкм і Царамам – 10–50 мкм [31]. На зразках, що мають найбільшу середню ступінь наклепу, після МАО було визначено характер зміни твердості по глибині поверхневого шару. Для цього було виготовлено косі шліфи під кутом 9° до оброблюваної поверхні. Вимірювання твердості виконували при навантаженні на індентор 0,2 Н. Результати вимірювань на зразках після МАО порошками Феромап 630/400 мкм, Царамам 630/400 мкм та S330 1200/900 мкм наведено рис. 3.11.

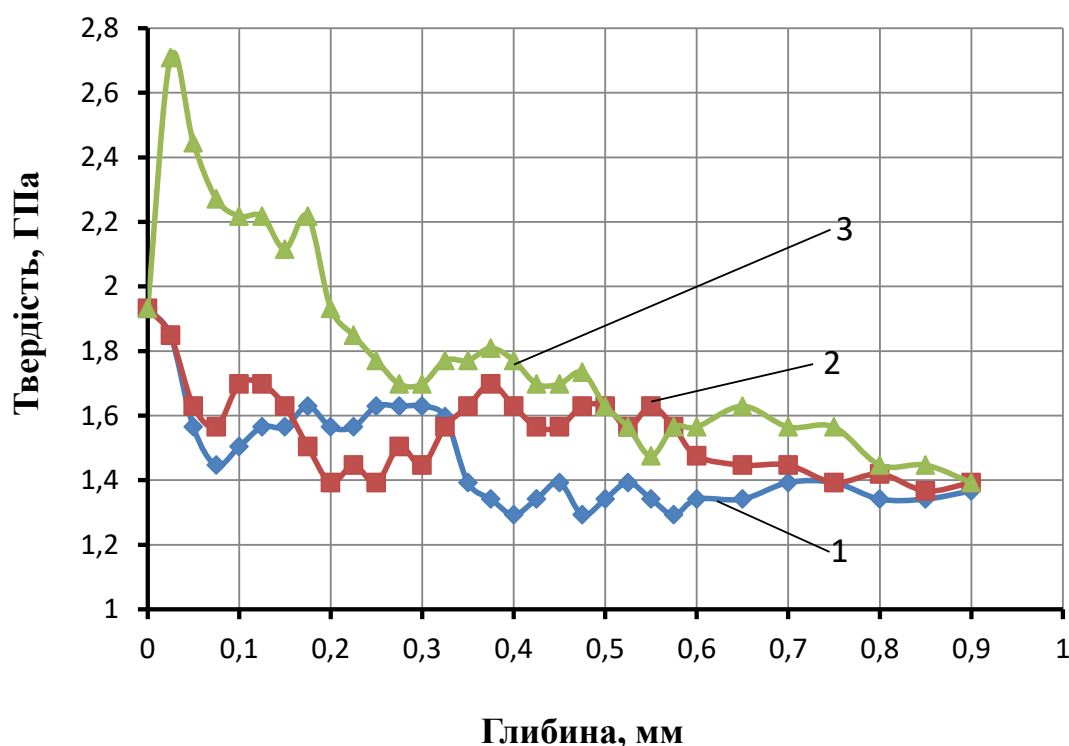


Рис. 3.11 Зміна значення твердості в залежності від глибини вимірювання поверхневого шару матеріалу зразків після МАО порошками Феромап 630/400 мкм – крива 1, Царамам 630/400 мкм – крива 2 і S330 1200/900 мкм – крива 3

Встановлено, що зміна твердості по глибині не є рівномірною. Отримані результати є підтвердженням результатів досліджень наведених в [19]. Результати демонструють, що після МАО порошком Феромап відбувається зростання твердості на глибині 120 – 320 мкм, в той час як після проведення МАО порошком

Царамам зростання твердості в поверхневому шарі відбувається на глибині 100 – 150 мкм і в шарі на глибині 350 – 570 мкм. Найбільші значення підвищення твердості в поверхневому шарі матеріалу зразків на глибині до 200 мкм має місце після виконання МАО округлим порошком S330 з розміром частинок 1200/900 мкм, який виконує переважне пластичне деформування поверхневого шару.

Отримані результати певним чином взаємозалежні із даними отриманими при визначенні залишкових напружень – найбільше зростання показника твердості в поверхневому шарі відповідає найбільшим залишковим напруженням.

Пояснення зазначеному факту пов'язано з структурною і дефектною перебудовами матеріалу зразків і потребує подальших ретельних мікроструктурних досліджень.

3.3.2 Поверхневі залишкові напруження після проведення МАО

При визначенні залишкових напружень, що виникають в зразках після МАО використовували методику, аналогічну запропонованій в роботі [69] на зразках свідках.

Отримані чисельні значення розрахунків внутрішніх напружень виконували із міркувань того, що маємо справу зі зразком у вигляді консольної балки довжиною l навантаженої рівномірно розподіленим навантаженням q , яке імітує дію магнітно-абразивного інструменту в процесі МАО.

Після виконання оброблення МАО під час вивільнення одного краю зразка із пристосування для закріплення та утримання зразків у вигляді пластинок, під дією залишкових напружень, що сформувались у поверхневому шарі, спостерігається його деформування.

За результатами наведеними в таблиці 3.2 можна оцінити залежність чисельного значення величини сформованих в процесі оброблення внутрішніх напружень поверхневого шару оброблених дослідних зразків як від величини робочого магнітного зазору, так і від типу використаного порошку.

Таблиця 3.2 – Залишкові напруження та деформація зразків після МАО

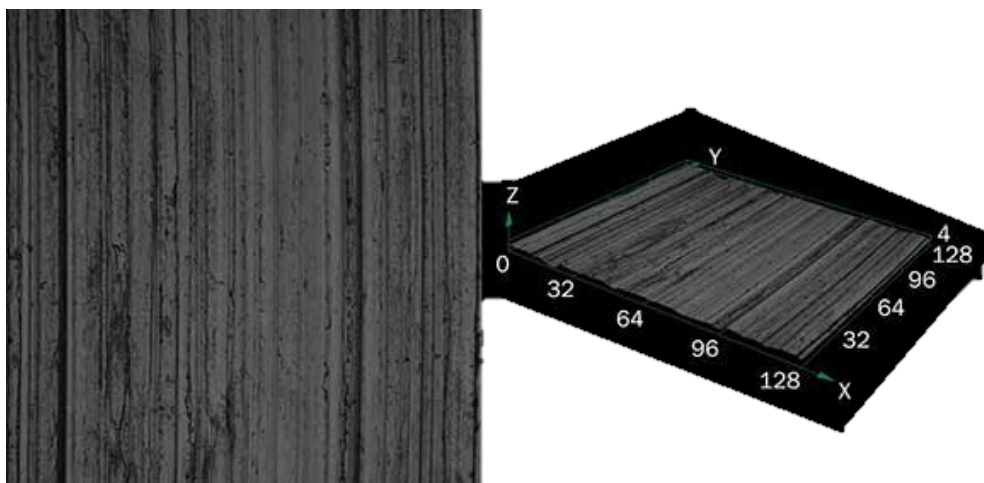
Абразивний матеріал	Товщина зразка, мм	Довжина зразка, мм	Прогин зразка, мм	Величина робочого зазору, мм	Залишкові напруження, МПа
Феромап 630/400 мкм	0,83	65,4	0,6375	3	51,2
	0,84	66,9	0,5281	3,5	41,0
	0,84	68	0,5344	4	40,2
	0,84	65,7	0,3688	5	29,7
Царамам 630/400 мкм	0,83	67,4	1,1278	3	85,3
	0,85	66,8	0,9167	4	72,3
	0,84	66,8	0,63	4,5	49,1
	0,81	67,5	0,72	5	53,0
S330 1200/900 мкм	0,83	66,7	0,97	3	74,9
	0,86	66	1,22	4	99,7
	0,82	66,7	1,24	4,5	94,6
	0,82	67	0,9	5	68,1

Встановлено, що найбільші значення стискаючих залишкових напружень (до 100 МПа) формуються після МАО плоских поверхонь головками типу "щітка" на базі постійних магнітів високої потужності з використанням округлих порошкових матеріалів, які забезпечують переважне пластичне деформування поверхневого шару, його мікронаклепування без значного видалення матеріалу, яке притаманне МАО порошками з осколковою формою частинок типу Феромап, що підтверджує зовнішній вигляд поверхонь після МАО (рис. 3.10).

3.4 Вплив на шорсткість поверхні та характеристики опорної поверхні деталей розміру, виду фракції МАП та початкової шорсткості

Перший етап експериментальних досліджень виконували при обробці плоских поверхонь на зразку з феромагнітної сталі 40Х, отриманих після верстатного механічного оброблення торцевим фрезеруванням. Отриману поверхню після фрезерування додатково піддавали плоскому шліфуванню для того щоб зменшити вплив на шорсткість спадковості оброблення. Порівняння оброблених методом МАО поверхонь та вихідних поверхонь після фрезерування виконували за результатами зміни параметрів шорсткості, частотного розподілу висот мікронерівностей та величини опорної поверхні профілю, контролювали на квадратних ділянках 2 х 2 мм, за допомогою оптичних та комп'ютеризованих вимірювальних приладів (рис. 3.12). З урахуванням результатів досліджень, наведених в [43, 48, 49, 62, 64-67] в якості магнітно-абразивних порошків використовували осколковий рівновісний Феромап з розміром частинок 630/400, 400/315, 315/200, 200/100 мкм та сферичні порошки S330 1400/1000 та ДЧЛ 1800/1400 мкм (рис. 3.14). При обробленні варіювали величину робочого зазору в діапазоні від 1 до 3 мм – для дрібнофракційних МАП та від 2 до 3 мм для крупних порошків, частота обертання торцевого індуктора 900 об / хв., швидкість поперечної подачі індуктора у всіх випадках становила 10 мм / хв.

Отримані результати оброблення, замірів параметрів шорсткості та опорної поверхні наведені на рис. 3.15 – 3.16.



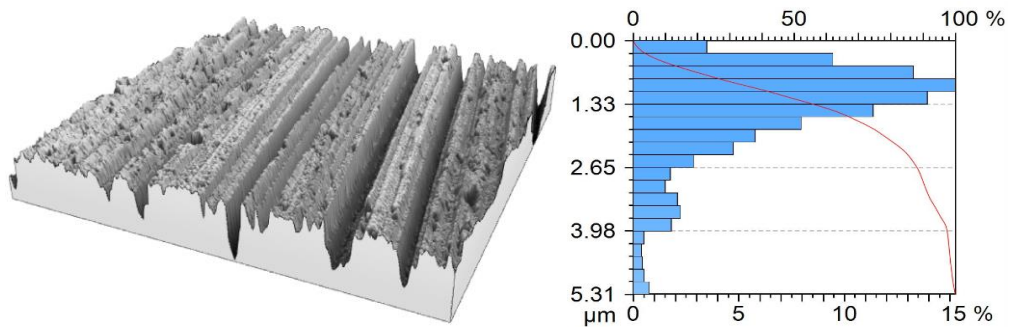


Рис. 3.12 Стан поверхні після плоского шліфування

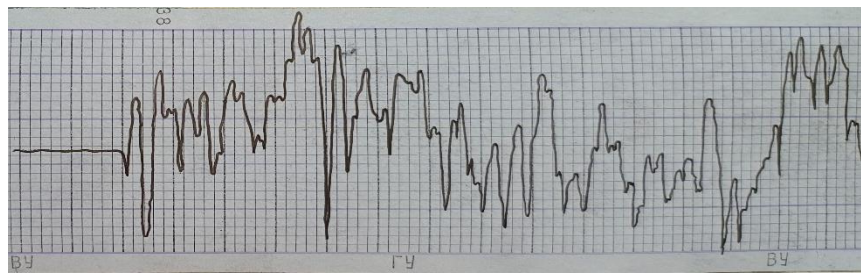


Рис. 3.13 Профілограма поверхні після шліфування $Ra \leq 0,4 \dots 0,5$

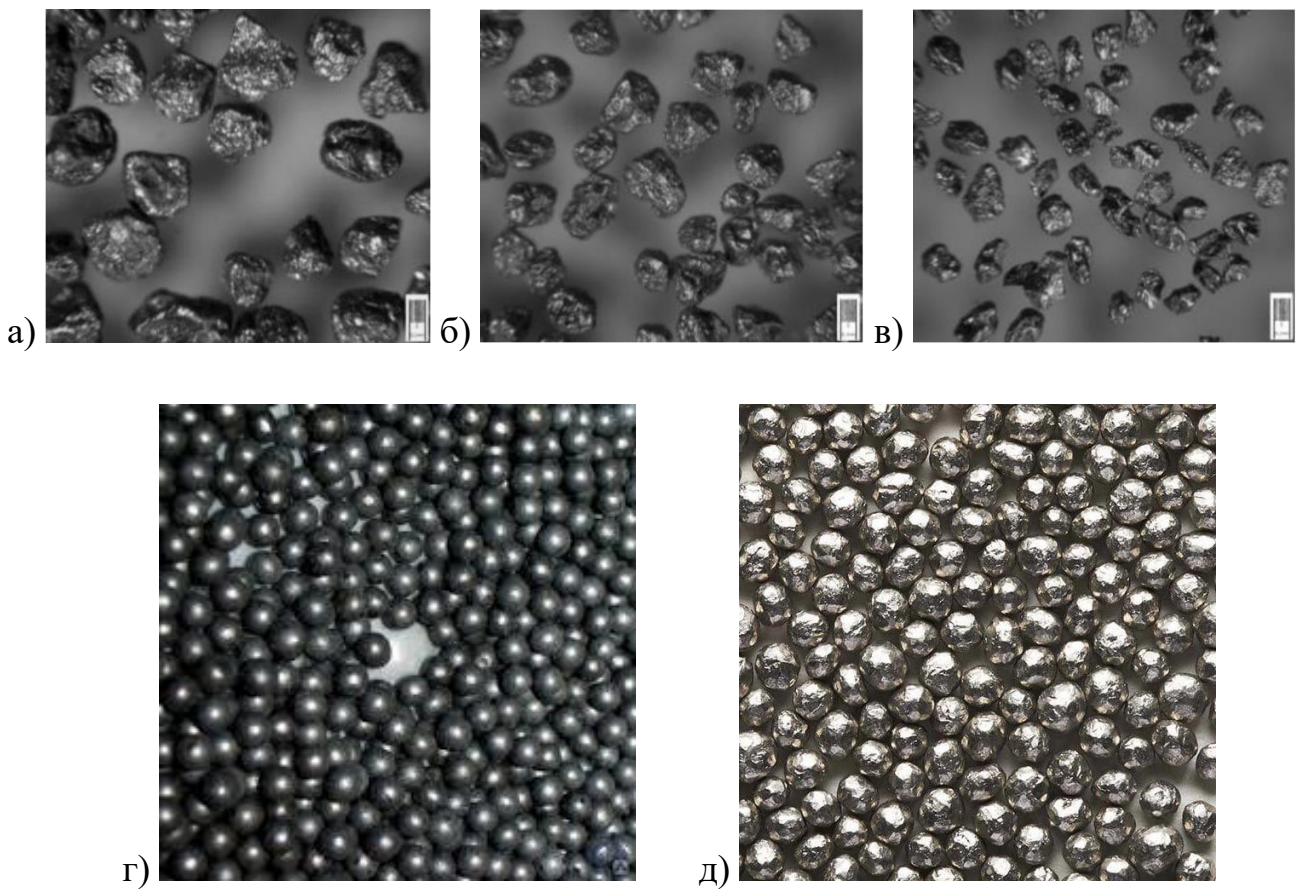
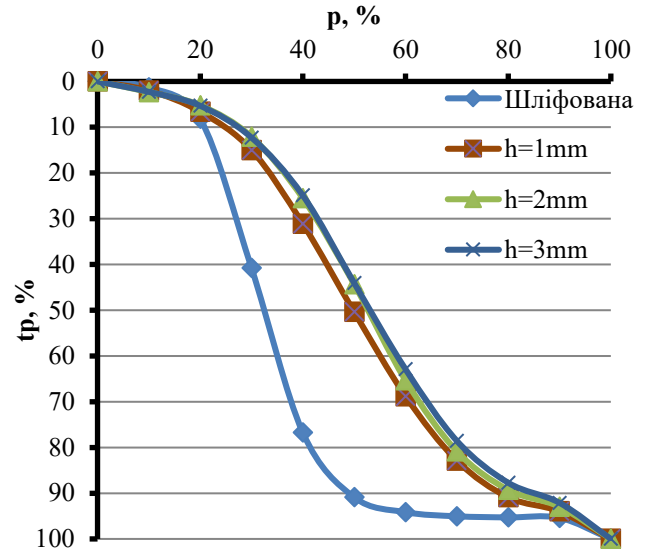
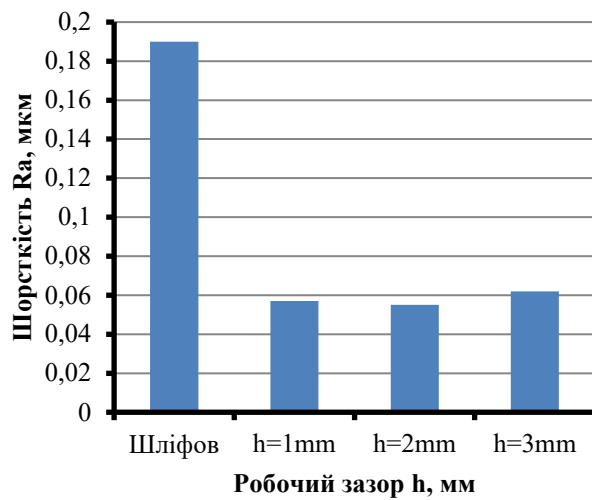
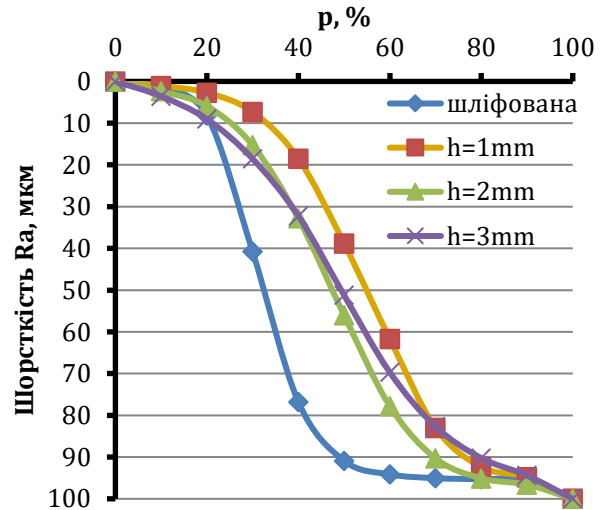
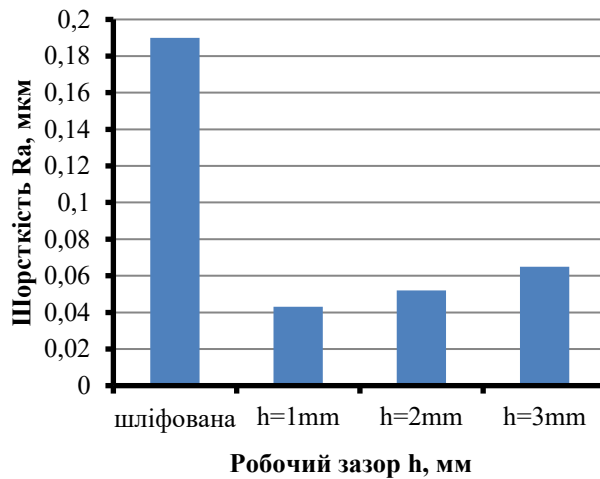


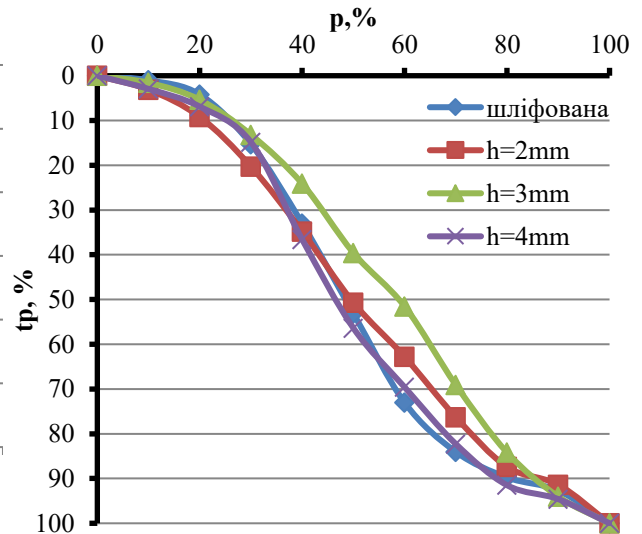
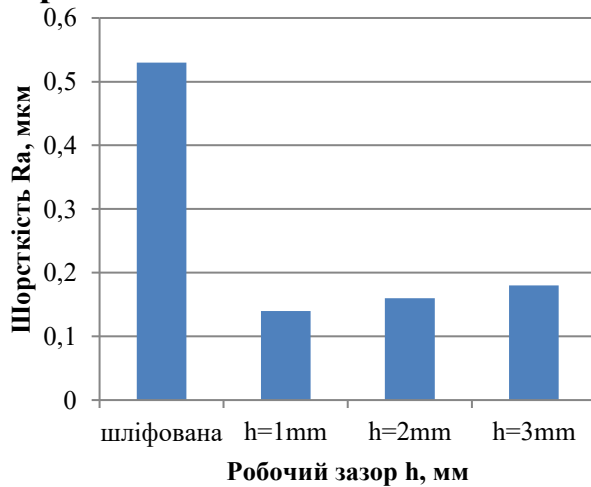
Рис. 3.14 Зовнішній вигляд часток МАП: а) Феромап 630/400 мкм, б) Феромап 400/315 мкм, в) Феромап 315/200 мкм, г) ДЧЛ 1800/1400 мкм, д) S330 1400/1000 мкм.

Феромап 200/100

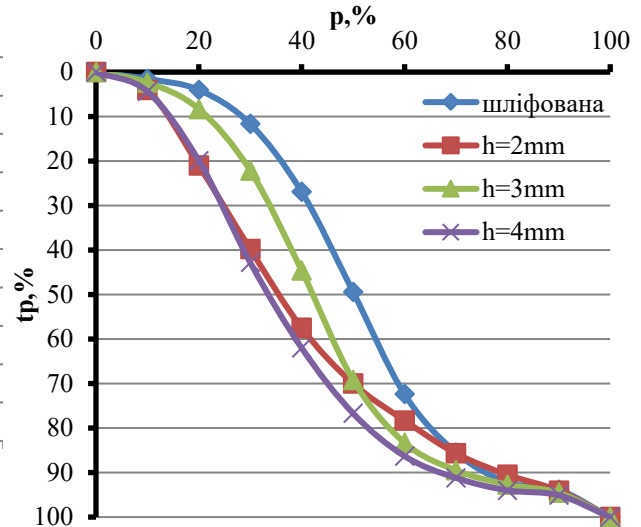
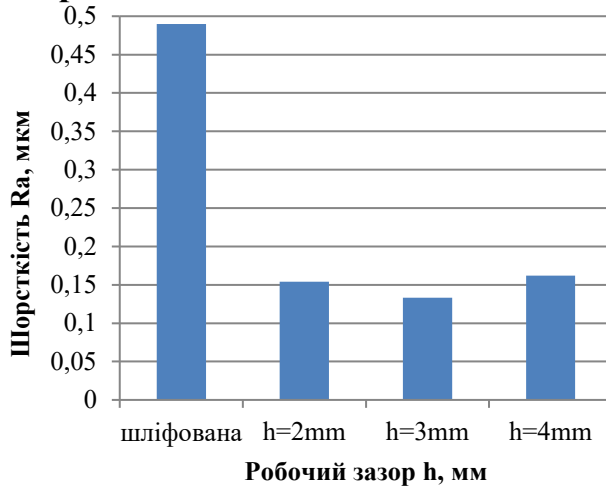
а)

Феромап 315/200

б)

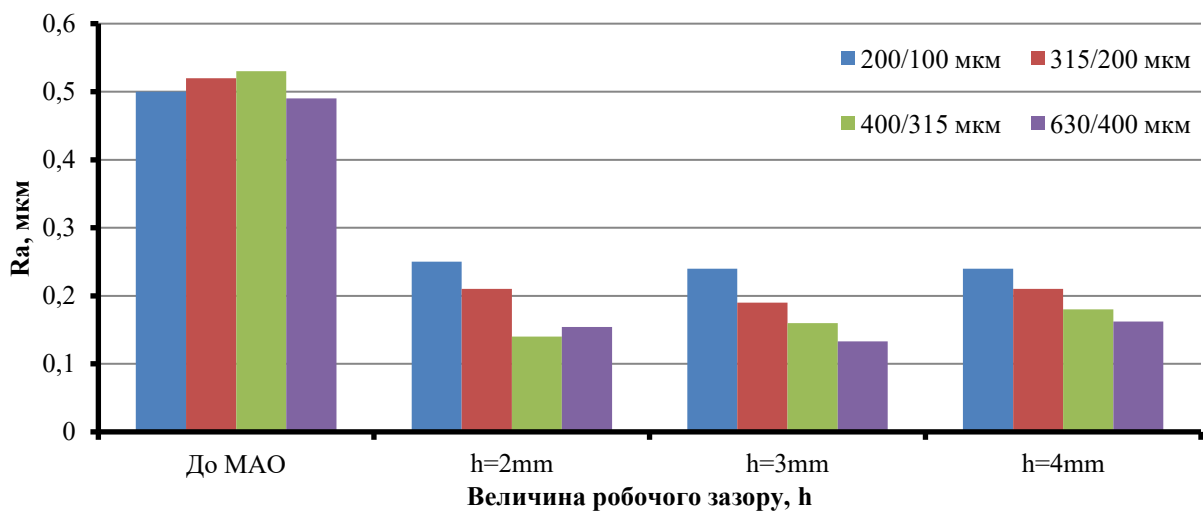
Феромап 400/315

в)

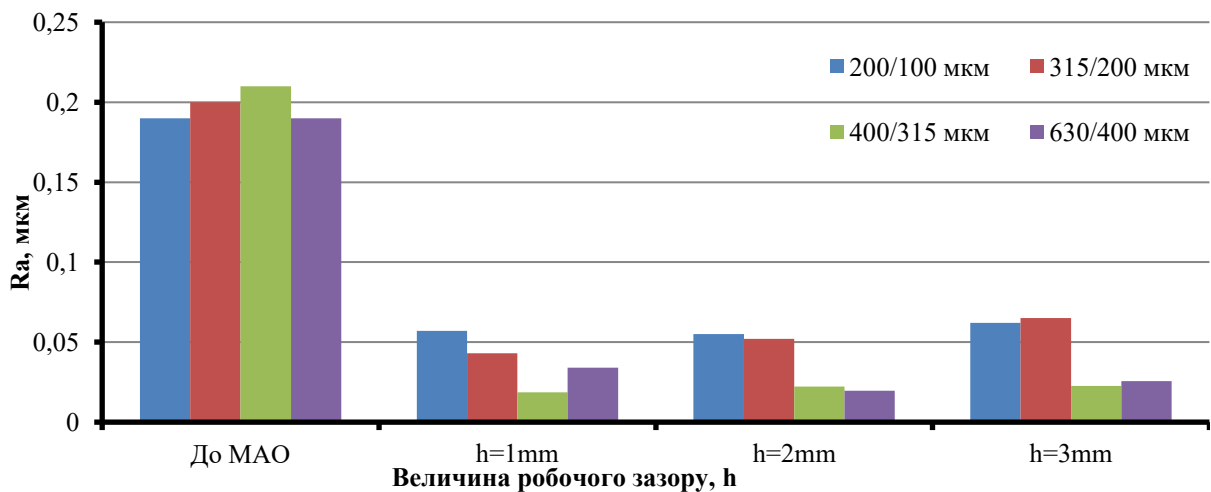
Феромап 630/400

Г)

Рис. 3.15 Значення параметрів шорсткості та графік зміни величини опорної поверхні мікропрофілю від його відносної висоти після МАО: а) Феромап 200/100 мкм; б) Феромап 315/200 мкм; в) Феромап 400/315 мкм; Феромап 630/400 мкм.



а)



б)

Рис. 3.16 Значення параметрів вихідної шорсткості за початкової на рівні:

а) $Ra = 0,4 \dots 0,5$ мкм; б) $Ra = 0,19 \dots 0,21$ мкм

Проаналізувавши отримані дані, можна зробити висновок, що чим менша шорсткість поверхні до МАО тим кращою буде якість поверхні після МАО, що свідчить про високу залежність вихідних параметрів МАО від спадковості від попередніх методів оброблення та поверхневого стану шару, що піддається обробці в цілому.

При цьому при початковій шорсткості R_a в межах 0,19 ... 0,21 мкм вдалось отримати вихідну шорсткість в межах $R_a=0,02$ мкм. У випадку, коли початкова шорсткість R_a знаходиться в межах 0,4 ... 0,5 мкм вдалось отримати значення вихідної шорсткості в межах $R_a=0,14$ мкм.

Розглянувши зміни кривих залежності зміни величини опорної поверхні мікропрофілю від його відносної висоти після МАО можна зробити висновок, що при використанні порошків осколької рівновісної форми із розміром фракції 100 – 630 мкм відбувається зміщення кривої залежності вліво та вниз, що свідчить про проходження ефективного процесу видалення матеріалу внаслідок ударно-фрикційної взаємодії МАП і оброблюваної поверхні та те, що висотні елементи профілю видаляються, зменшуючи загальну шорсткість та утворюючи нові мікронерівності профілю внаслідок пластичної деформації та видалення матеріалу.

Також прослідковується наступна тенденція, що при обробленні МАО поверхні із нижчою поверхневою шорсткістю вдається досягти менших значень шорсткості ніж при обробленні такої, що має початкові значення шорсткості вищі. Це можна пояснити тим, що при МАО відсутні великі значення сил різання і для видалення великих об'ємів матеріалу цих сил не достатньо, а в самому процесі магнітно-абразивного оброблення відбувається процес переважного полірування поверхні.

Таким чином згідно отриманих результатів проведених досліджень та вимірювань механізм видалення матеріалу при виконанні МАО із застосуванням осколькочастих абразивних матеріалів буде мати наступний вигляд та умовно зображений на рис. 3.17.

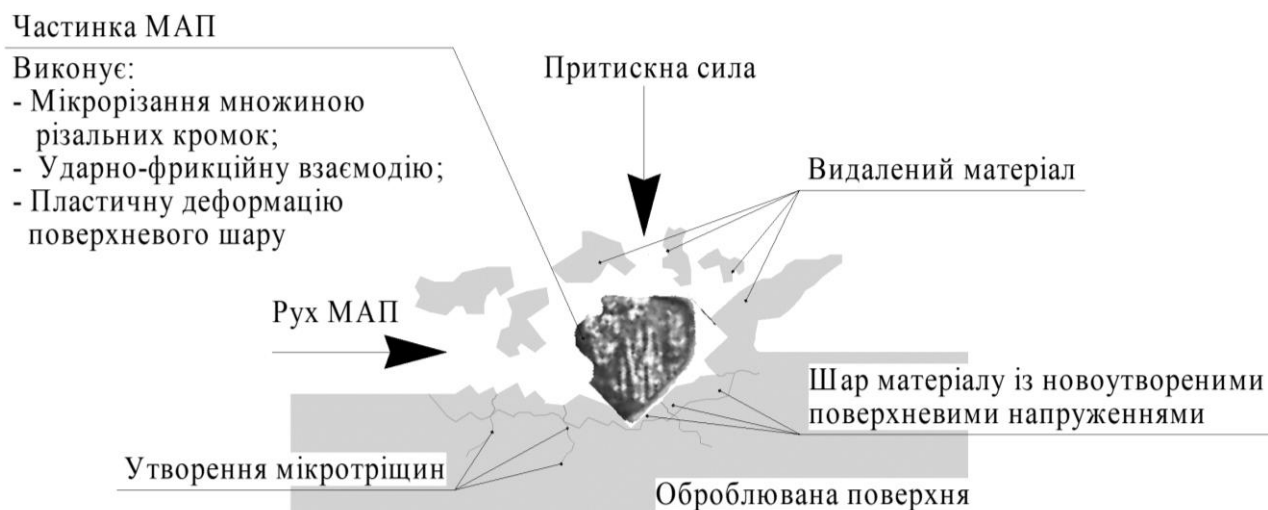


Рисунок 3.17 – Механізм взаємодії частинок магнітно-абразивних матеріалів осколької форми

В результаті оброблення утворюється новий мікропрофіль поверхні параметри шорсткості якого мають взаємозв'язок із розміром фракції абразиву В загальному випадку зменшення розміру МАП веде до підвищення якості поверхні, що виражається у зменшенні шорсткості обробленої поверхні відповідно до граничних значень, що можуть бути отримані використаними абразивними матеріалами.

Розглянемо результати оброблення сферичними рівновісними порошками, що наведені на рис. 3.18 – 3.20.

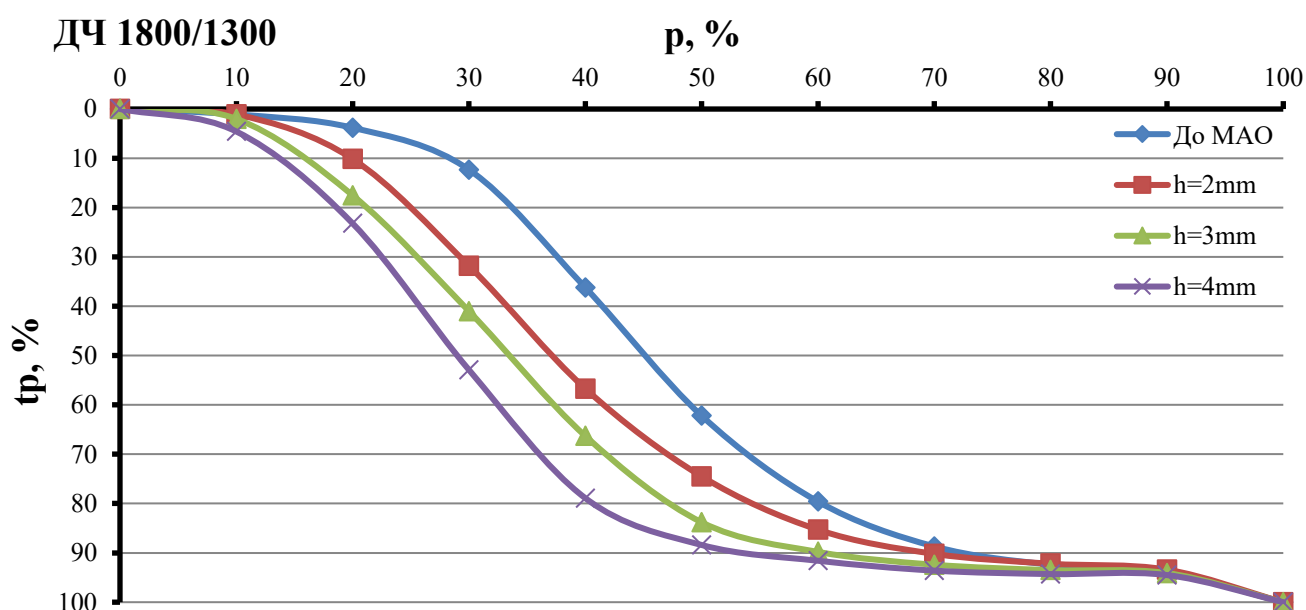


Рис. 3.18 Графік зміни величини опорної поверхні мікропрофілю від його відносної висоти після МАО порошком ДЧ 1800/1300 мкм.

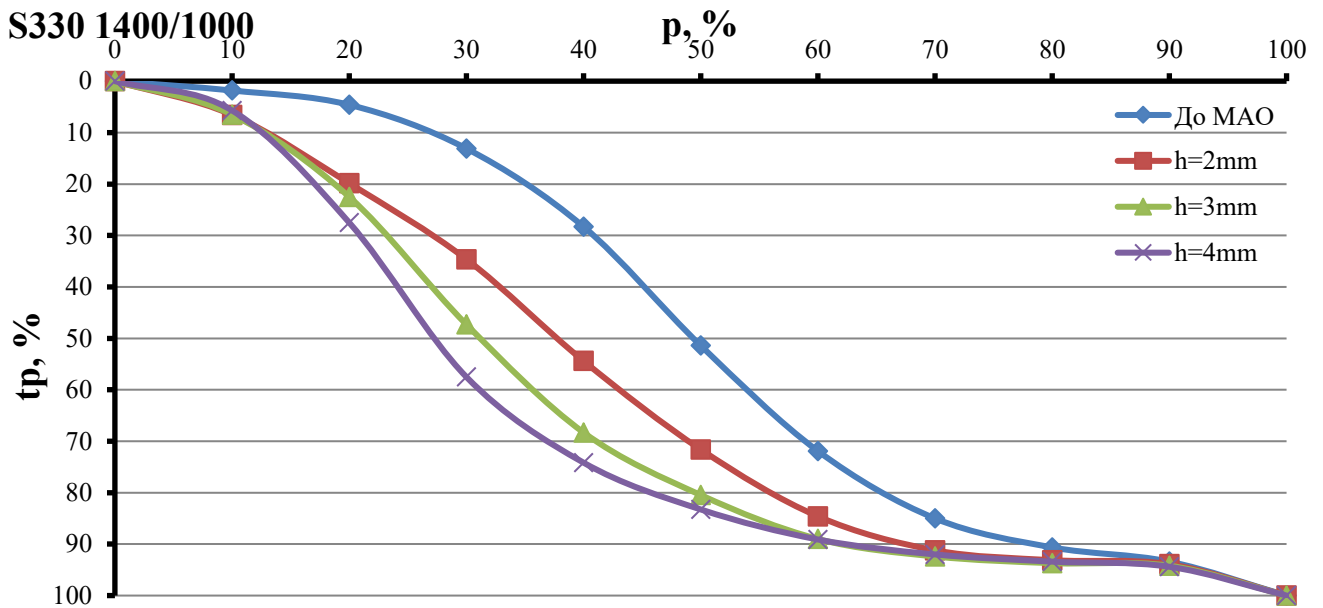


Рис. 3.19 – Графік зміни величини опорної поверхні мікропрофілю від його відносної висоти після MAO порошком ДЧ 1800/1300 мкм.

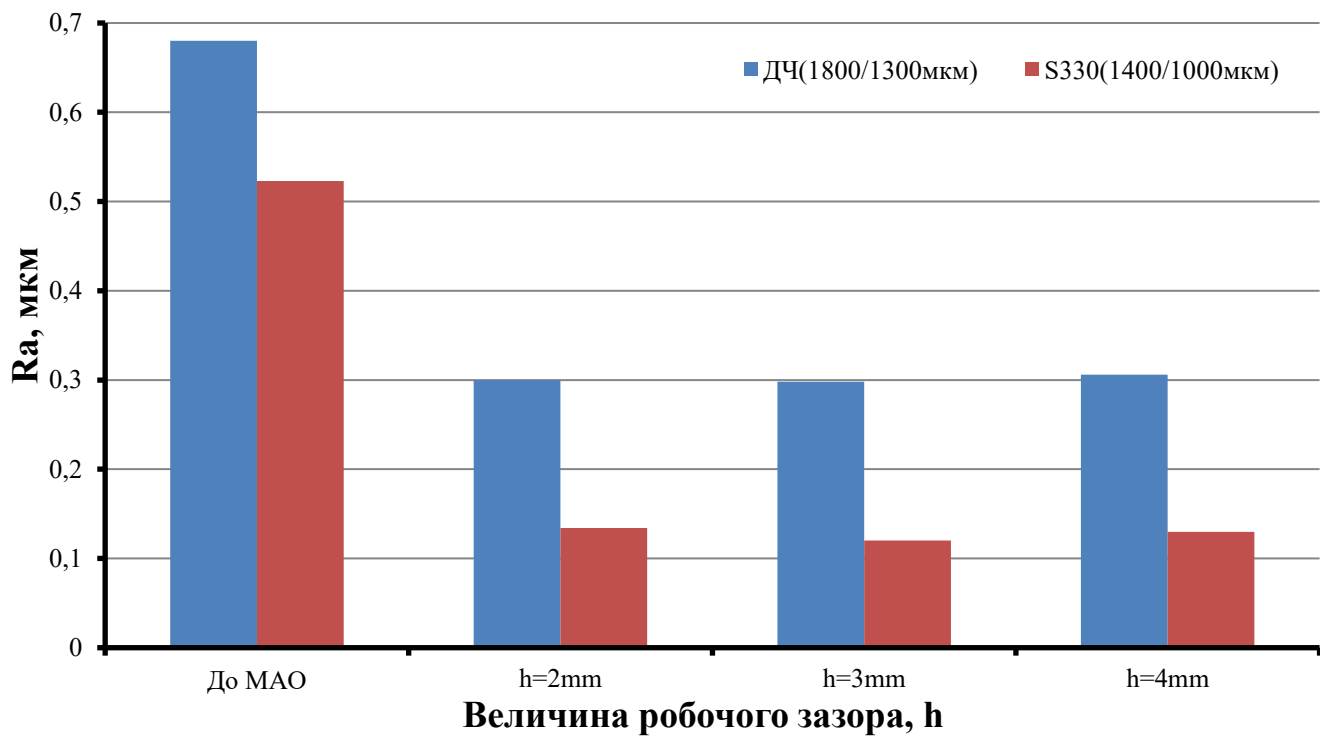


Рис. 3.20 Гістограма зміни величин параметру шорсткості для порошків ДЧ 1800/1300 та S330 1400/1000 мкм

Одержані результати можна пояснити декількома факторами, тут, як і у випадку із порошками групи Феромап зберігається тенденція до залежності вихідної шорсткості від початкової. При цьому результат продемонстрований

МАП S300 є кращим за такий при використанні ДЧ, це пояснюється дрібнішими часточками, що утворюють порошок.

Окрім цього варто відмітити відмінність кривих зміни величини опорної поверхні мікропрофілю від його відносної висоти у порівнянні із вище наведеними результатами – при використанні крупнофракційних сферичних порошоків відбувається переважно процес пластичної деформації, при якому відбувається полірування поверхні та видалення вершин, а характер зміни кривої свідчить про процес грубого оброблення із підвищеною ударно-фрикційною взаємодією між МАП та оброблюваною поверхнею. Також для МАО із використанням сферичних порошоків, характерно відносно низький рівень зниження шорсткості, за рахунок форми поверхні МАП, яка не має множини різальних кромek, а при обробленні поверхонь такими порошками спостерігається високий вплив на поверхневі напруження внаслідок інтенсивної ударно-фрикційної взаємодії.

У випадку із сферичними порошковими матеріалами механізм видалення матеріалу при виконанні МАО із застосуванням буде мати наступний вигляд та умовно зображений на рис. 3.21.

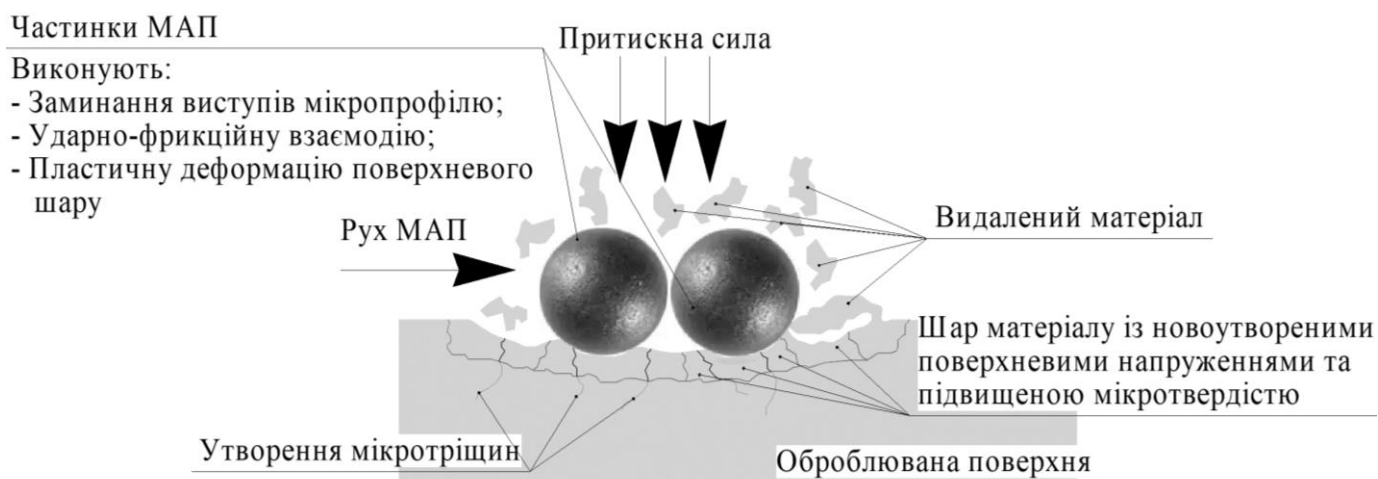


Рисунок 3.21 – Механізм взаємодії частинок магнітно-абразивних матеріалів сферичної форми

В результаті оброблення утворюється нова поверхня із розгладженим мікропрофілем, при цьому як буде доведено подальшими експериментальними дослідженнями новоутворена поверхня набуває підвищеного значення поверхневої

мікротвердості разом із перерозподілом внутрішніх напружень у приповерхневому шарі матеріалу.

Оскільки при виконанні оброблення оскольчастими порошками відбувається переважно видалення матеріалу із утворенням нової поверхні, а при МАО сферичними МАП – переважним є процес пластичної деформації без значного видалення матеріалу – доцільно буде застосувати поєднання магнітно-абразивних порошків різних форм для поєднання характеристик та властивостей, що забезпечуються в результаті оброблення даними МАП окремо. Зважаючи на те, що в машинобудуванні відомі види оброблення із попередньою пластичною деформацією (прокатування, кування, протягування) – при яких перед основним процесом різання (наприклад, токарною, фрезерною або свердлильною обробкою) матеріал піддається попередньої пластичної деформації, що сприяє зміні мікроструктури матеріалу та призводить до таких переваг:

- Зменшуються зусилля під час різання;
- Поліпшується структура матеріалу;
- Знижується опір різанню.

Тому передбачається, що використання суміші вище наведених МАП буде мати аналогічний механізм взаємодії до методів оброблення із попередньою пластичною деформацією. Можна запропонувати, що суміш сферичних та оскольчастих МАП буде утворювати рухомо-скоординований притир. Очікується, що рухливі частинки МАП та їх взаємний рух чи перерозподіл буде мати позитивний вплив на абразивну здатність МАО. При цьому, так як контакт між поверхнями окремих зерен МАП є динамічним процесом, де кожне зерно може переміщатися, прокочуватися та ковзати по поверхні матеріалу, ця взаємодія може бути описана як динамічний рух під час якого абразивні частинки взаємодіють один з одним залежно від їх розташування та співвідношення з матеріалом, що призводить до більш ефективного руйнування мікроструктури оброблюваної поверхні. Передбачається, що одночасно із процесом абразивного оброблення матеріалу поверхня піддається попередній пластичній деформації, що призводить до поліпшення мікроструктури. Ця деформація може зменшити внутрішні

напруження, покращити структуру зерна і підвищити однорідність матеріалу, що робить його більш податливим до подальшого оброблення.

Очікується, що, попередня пластична деформація матеріалу може полегшити процес абразивної оброблення, так як матеріал вже матиме покращені механічні властивості: менші залишкові напруження, поліпшену зернистість і підвищену поверхневу мікротвердість. Ці покращення дозволяють абразивним частинкам легше врізатися в матеріал, а також знизити зношування самих абразивних частинок. З одного боку, процес видалення матеріалу прискорюється за рахунок осколкових частинок, а з іншого - знижується шорсткість та підвищується якість поверхні завдяки сферичним частинкам, які забезпечують гладку поверхню із підвищеною мікротвердістю.

3.5 Вплив на шорсткість та стан опорної поверхні деталей після МАО із застосуванням композиційного складу МАП

На другому етапі експериментальних досліджень проводилось оброблення плоских поверхонь на аналогічних зразках та за тими ж самими параметрами поверхневого шару як і на першому етапі. В якості магнітно-абразивних порошків використовували композиції із порошків в наступних пропорціях:

а) Округлий сферичний ДЧ із розміром частинок 1800/1300 мкм із додаванням рівновісного Феромапу з розміром частинок 630/400 мкм, співвідношення 50%/50%. Результати наведено на рис. 3.23.

б) Округлий сферичний ДЧ із розміром частинок 1800/1300 мкм із додаванням рівновісного Феромапу з розміром частинок 630/400 мкм, співвідношення 50%/100%. Результати наведено на рис. 3.24.

в) Округлий сферичний ДЧ із розміром частинок 1800/1300 мкм із додаванням рівновісного Феромапу з розміром частинок 315/200 мкм, співвідношення 50%/50%. Результати наведено на рис. 3.25.

г) Округлий сферичний ДЧ із розміром частинок 1800/1300 мкм із додаванням сферичного нерівновісного порошку із швидкорізальної сталі ПР Р6М5 (рис. 3.22) з розміром частинок 200/100 мкм, співвідношення 100%/50%.

При обробленні варіювали величину робочого зазору в діапазоні від 2 до 4 мм, як для випадку використання крупних порошків, частота обертання торцевого індуктора 900 об / хв., швидкість поперечної подачі індуктора у всіх ітераціях становила 10 мм / хв. Результати оброблення наведено на рис. 3.26.

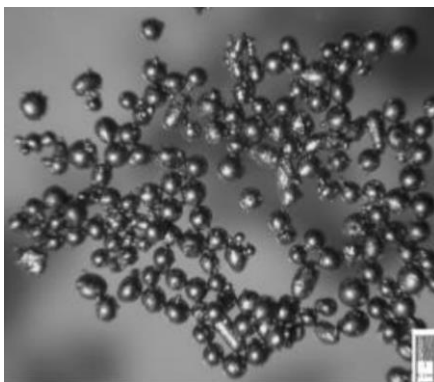


Рис. 3.22 Зовнішній вигляд часток МАП ПР Р6М5 200/100 мкм

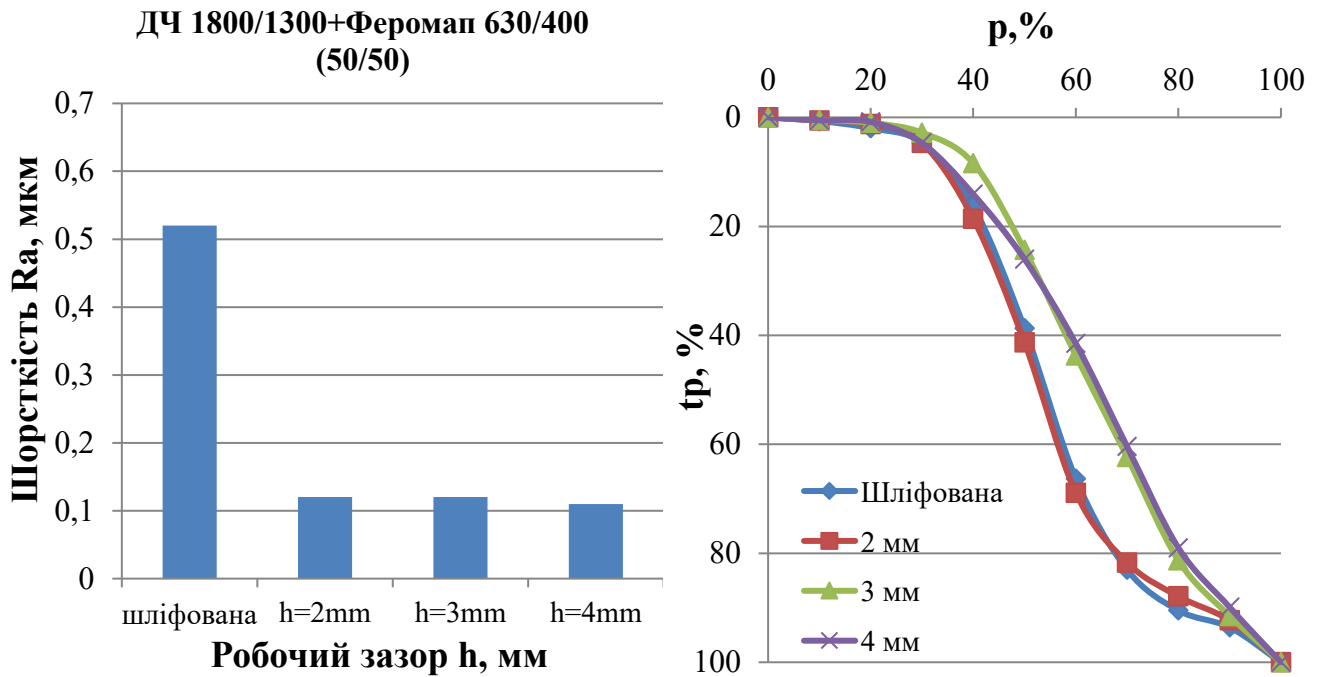


Рис. 3.23 Значення параметрів шорсткості та графік залежності зміни величини опорної поверхні мікропрофілю від його відносної висоти після МАО сумішшю МАП ДЧ 1800/1300 мкм та Феромап 630/400 мкм. Співвідношення фракцій 1:1.

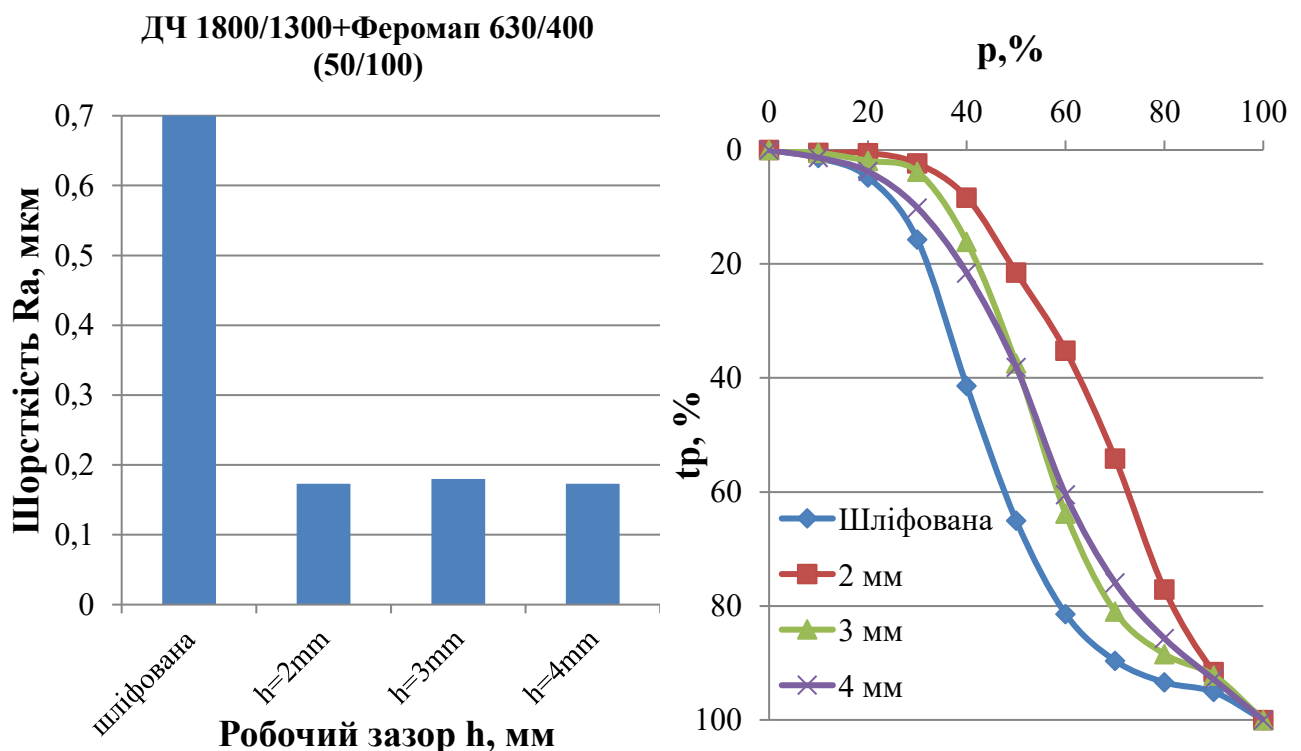


Рис. 3.24 Значення параметрів шорсткості та графік залежності зміни величини опорної поверхні мікропрофілю від його відносної висоти після МАО сумішшю МАП ДЧ 1800/1300 мкм та Феромап 630/400 мкм. Співвідношення фракцій 1:2.

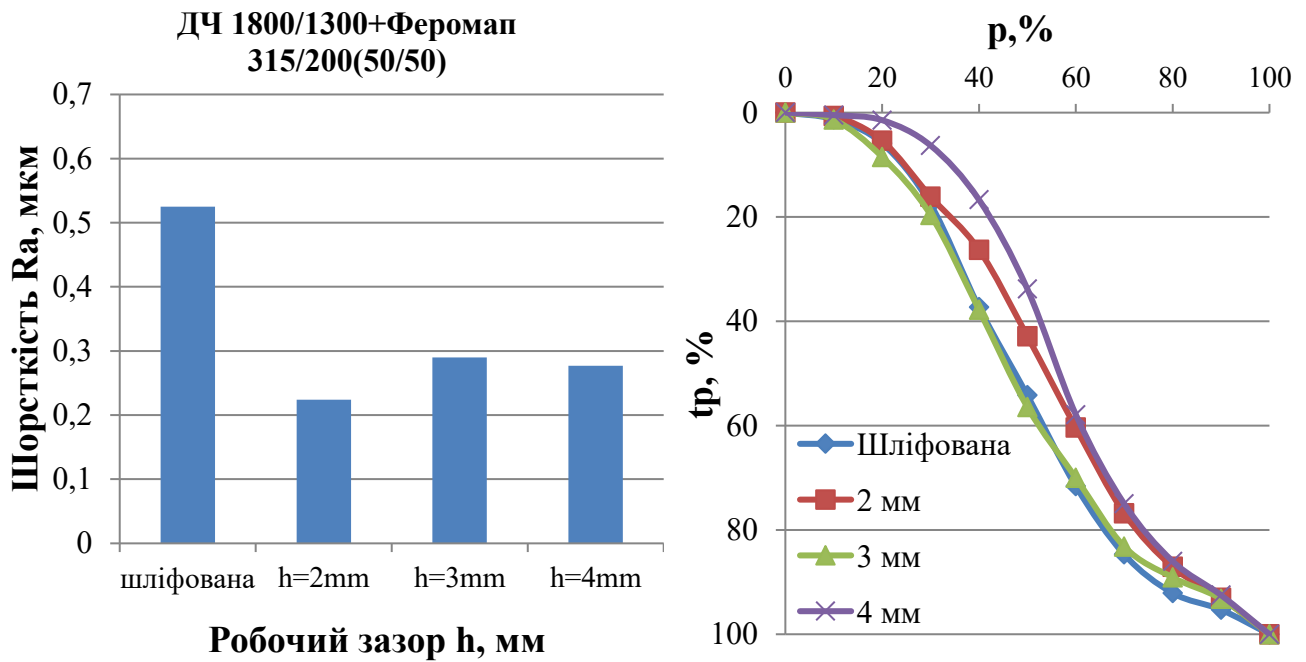


Рис. 3.25 Значення параметрів шорсткості та графік залежності зміни величини опорної поверхні мікропрофілю від його відносної висоти після МАО сумішшю МАП ДЧ 1800/1300 мкм та Феромап 315/200 мкм. Співвідношення фракцій 1:1.

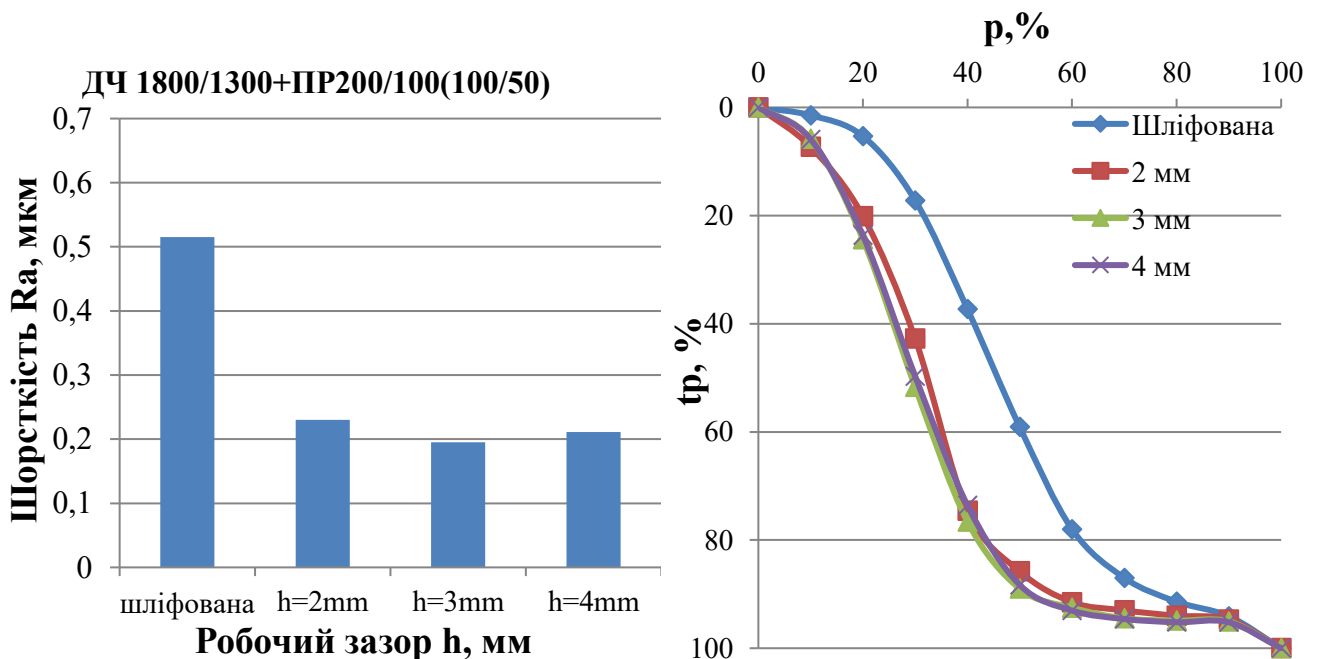


Рис. 3.26 Значення параметрів шорсткості та графік залежності зміни величини опорної поверхні мікропрофілю від його відносної висоти після МАО сумішшю МАП ДЧ 1800/1300 мкм та ПР200/100 мкм. Співвідношення фракцій 1:1.

Збірні гістограми порівняння отриманих результатів оброблення наведені на рис. 3.27 та 3.28.

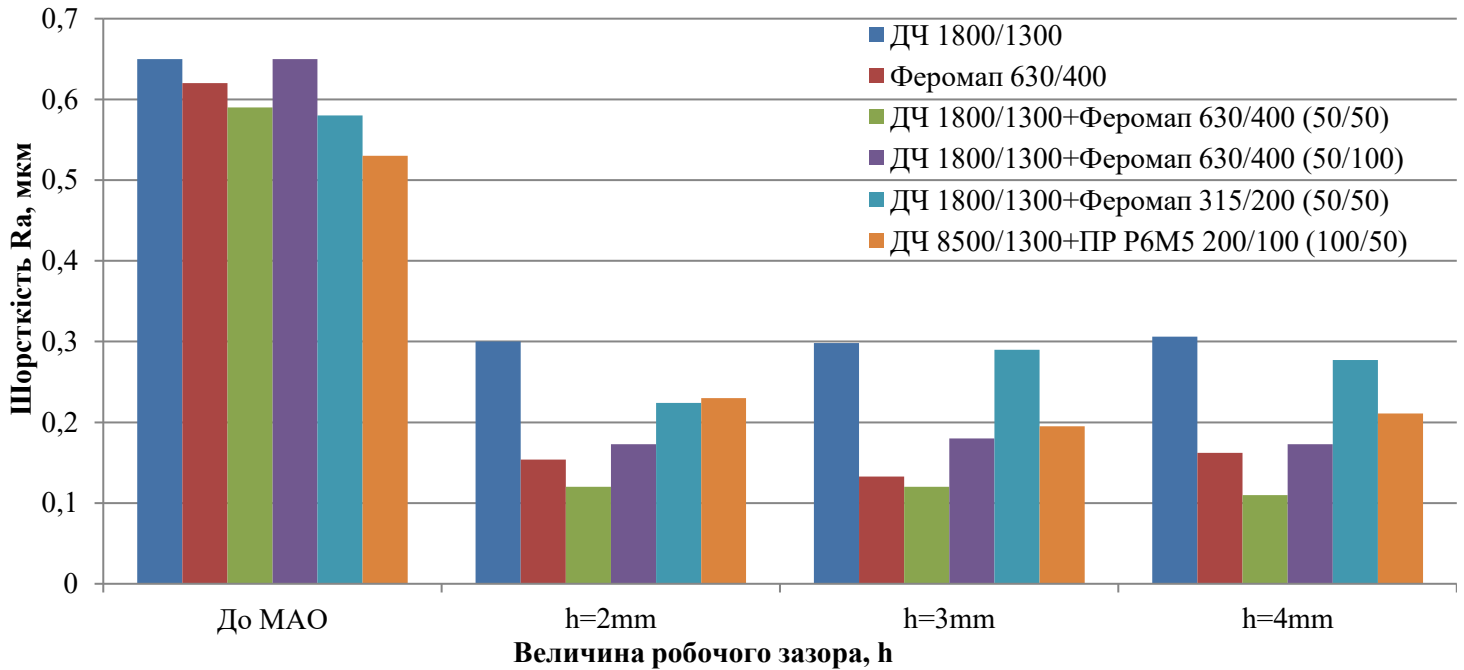


Рис. 3.27 Порівняльна гістограма шорсткості залежно від зазору

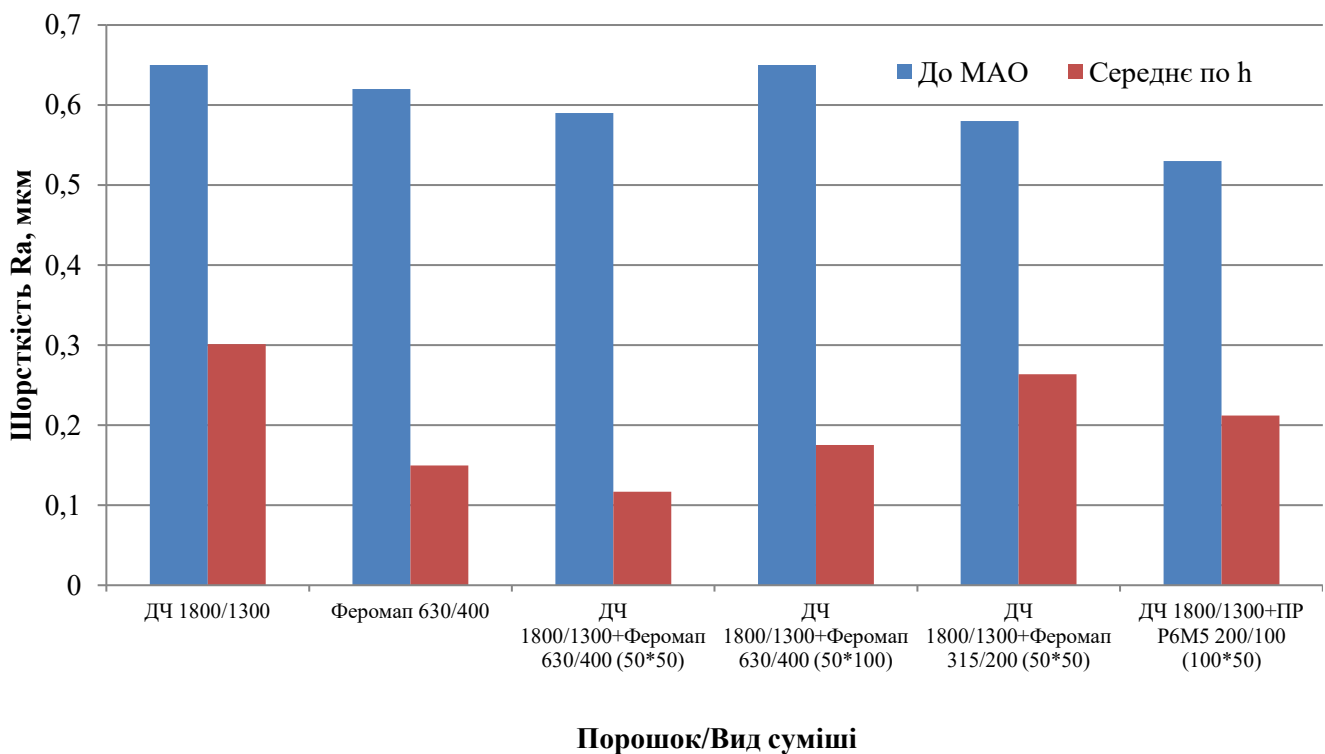


Рис. 3.28 Порівняльна гістограма зміни величини значення шорсткості в залежності від складу МАІ

Одержані результати зміни кривих залежності величини опорної поверхні мікропрофілю від його відносної висоти після МАО сумішшю оскольчастих

порошків та сферичних можна зробити висновок, що при використанні таких композицій із розміром фракції Феромап 315/200 та 630/400 мкм відбувається проходження ефективного процесу видалення матеріалу внаслідок взаємодії суміші МАП та оброблюваної поверхні при цьому, висотні елементи профілю видаляються, зменшується загальна шорсткість та утворюється новий мікропрофіль внаслідок пластичної деформації та видалення матеріалу. В цілому, процес протікає аналогічно до оброблення моно-порошками Феромап, при цьому отримані показники шорсткості мають вищі чисельні значення на 40-50% - пояснити це можна тим, що разом із меншим оскольчастим порошком використовується більший сферичний, що за рахунок ударно-фрикційної взаємодії із оброблюваною поверхнею призводить до утворення нового профілю відповідному розміру часток.

Якщо провести порівняння із обробленням сферичними порошками, то варто відмітити, що додавання гострих абразивних часток позитивно впливає на абразивні властивості суміші в цілому та демонструє покращення шорсткості до 30%.

Відсоткове співвідношення також має вплив на параметри шорсткості, а раціональне співвідношення сферичної частки та оскольчастої знаходиться в межах 50%. За такої комбінації зберігається інтенсивне перемішування та самовідновлення МАІ.

Варто також відзначити гірші результати суміші Феромап 315/200 та ДЧ 1800/1300 в порівнянні із Феромап 630/400 та ДЧ 1800/1300, це можна пояснити послабленням магнітної взаємодії між крупними та дрібними частками порошку, що призводить до заклинювання та залипання дрібнішої фракції на сферах.

У випадку оброблення сумішшю сферичних порошків ДЧ та ПР спостерігається процес переважного пластичного деформування та заповірювання мікронерівностей без інтенсивного утворення нових виступів та западин внаслідок недостатньої абразивної взаємодії МАП.

Встановлено, що застосовані суміші МАП для проведення МАО забезпечують зниження рівня мікрохвилястості поверхні. Про це свідчать

положення зон на кривих залежностей зміни величини t_p від рівня відносних висот профілю p , де відбувається перехід від мікровиступів до мікрозападин профілю поверхонь [70]. Наприклад для сумішей порошків Феромап з розміром частинок 630/400 і 315/200 мкм розташування зазначених зон зміщується від відносного рівня перетину $p=25,5\%$ після оброблення МАП із розміром частинок 630/400 мкм до рівня $p=50\%$ при використанні сумішей порошків з розміром частинок 630/400 і 315/200 мкм за умов зростання вмісту відносної кількості дрібної фракції і суміші до 0,4. Отримані данні підтверджують результати досліджень триботехнічних властивостей МАІ з сумішей порошків і вплив складу МАІ на їх експлуатаційні властивості [18]. Встановлено, що величина робочого зазору практично не має впливу на чисельне значення шорсткості R_a , яку отримуємо після МАО, що пов'язано з величиною зерна крупної фракції.

Використання при МАО магнітно-абразивного інструменту, який сформований із сумішей крупних округлих частинок порошку ДЧ (1800/1300 мкм) з дрібнішими осколькочастими частинками порошку Феромап з розмірами частинок 630/400, 315/200 і 200/100 мкм дозволило за умов оброблення з робочими зазорами в діапазоні 3 – 5 мм встановити, що як і у випадку використання сумішей з осколькочастими МАП величина робочого зазору в зазначеному діапазоні розмірів не має значного впливу на вихідні параметри шорсткості, що підтверджує попередні результати досліджень [64].

Показано, що найкращі результати оброблення отримано при використанні сумішей округлих порошків ДЧ 1800/1300 мкм і осколькочастих Феромап 630/400 мкм при їх співвідношенні в МАІ 1:1. За таких умов оброблення округлі крупні порошки, які мають значно більшу масу частинок та об'єм, а й відповідно більшу намагніченість, виконують роль рухомо-скоординованого притиру, передаючи силове навантаження на дрібні частинки. При цьому в процесі взаємодії з оброблюваною поверхнею крупні округлі частинки забезпечують як пластичне деформування мікронерівностей поверхні, так і безпосередньо поверхневого шару зразків [71], що забезпечує сприятливі умови для здійснення процесу мікрорізання осколькочастими порошками з меншими реальними радіусами різальних кромки.

3.6 Вплив на шорсткість та стан опорної поверхні при проведенні МАО сумішшю порошків із алмазним абразивом

Показано, що існує безпосередній зв'язок між триботехнічними властивостями композицій МАП з яких формується МАІ та його експлуатаційними характеристиками. Встановлено, що найвища поліруюча спроможність МАІ, що формується із з сумішей порошкових абразивних матеріалів притаманна крупним округлим порошкам з розмірами частинок більше 630 мкм з додаванням дрібних осколькочастих фракцій. На даному етапі дослідження будуть вестись із використанням суміші округлих та осколькочастих МАП розмірами від 1800 до 1000 мкм та алмазних паст розмірами часток від 2 до 40 мкм. Зовнішній вигляд абразивних часток алмазних паст наведений на рис. 3.29.

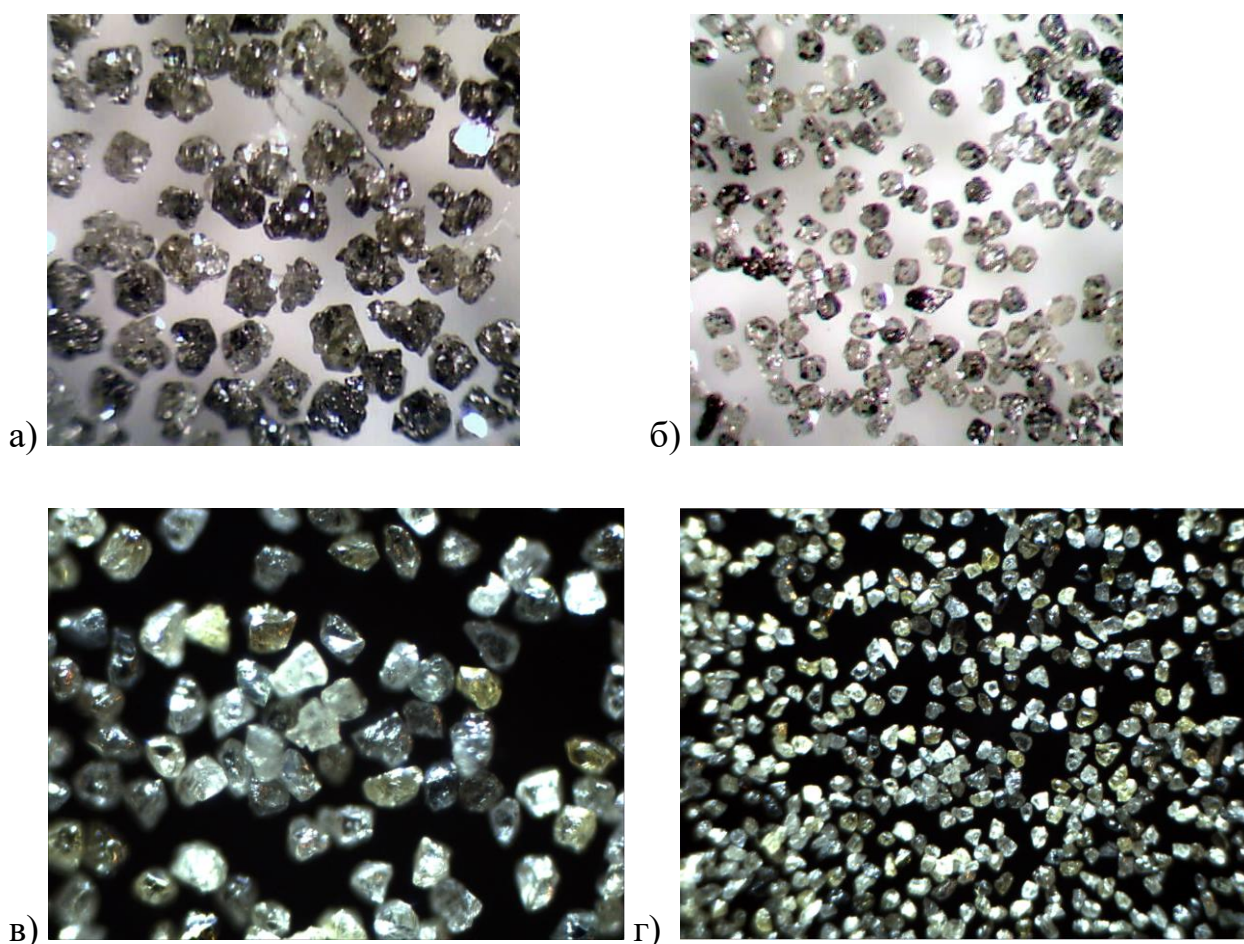
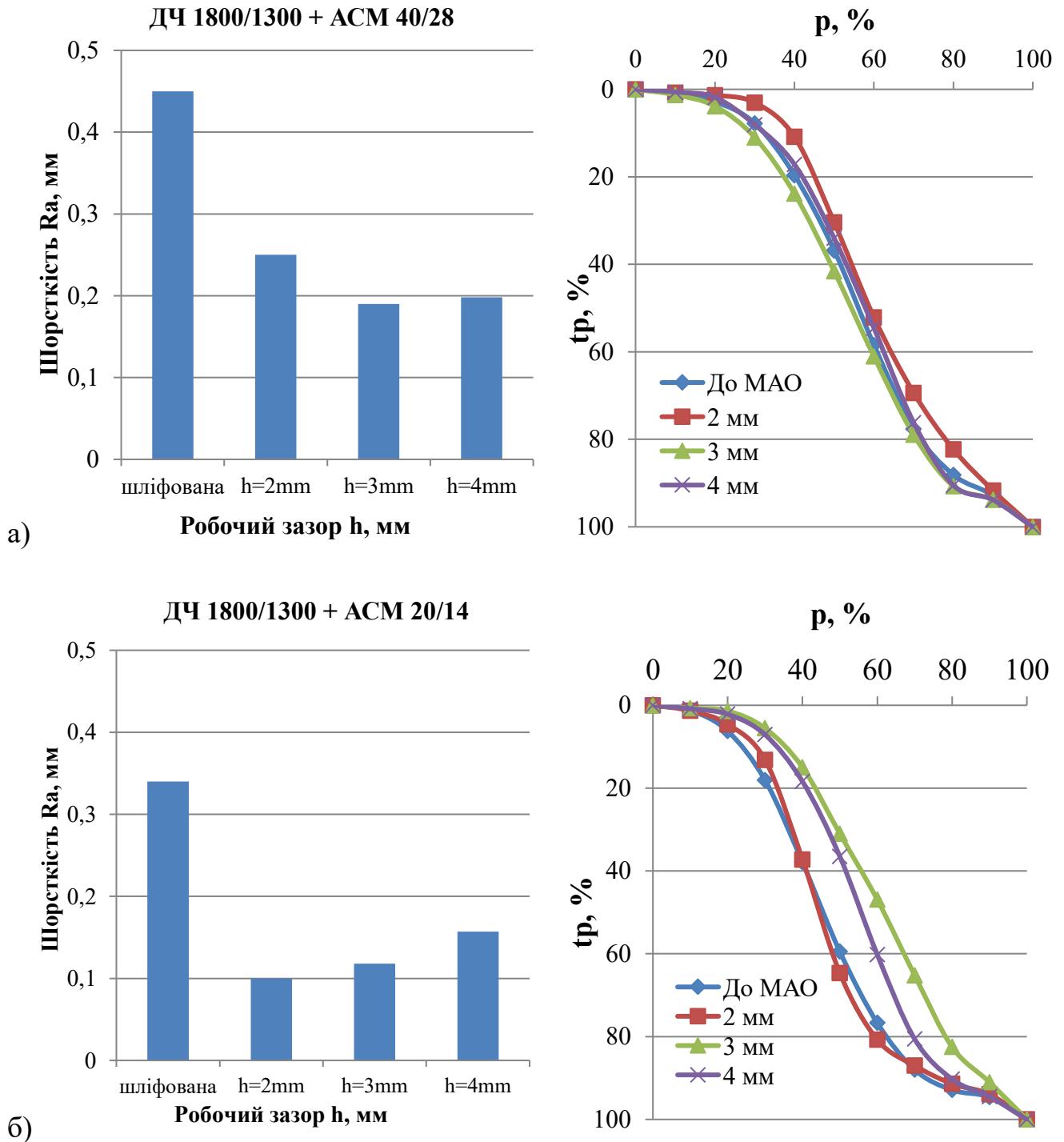
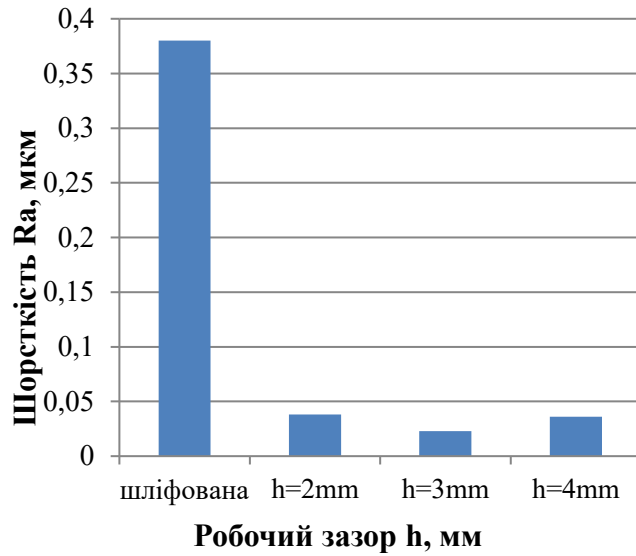


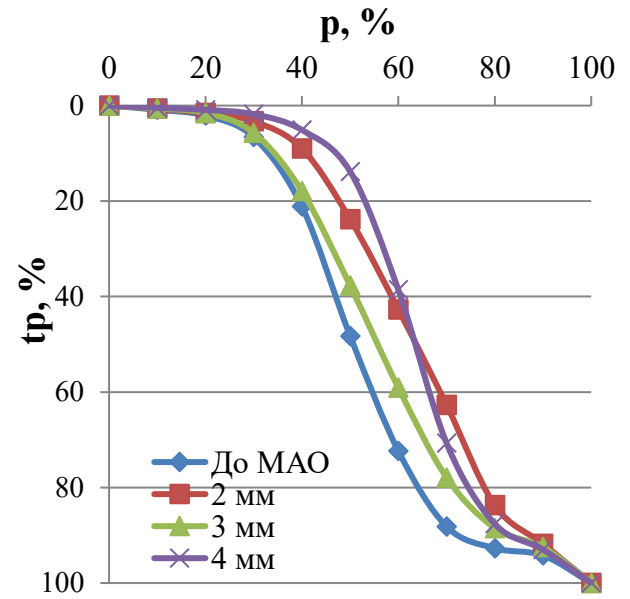
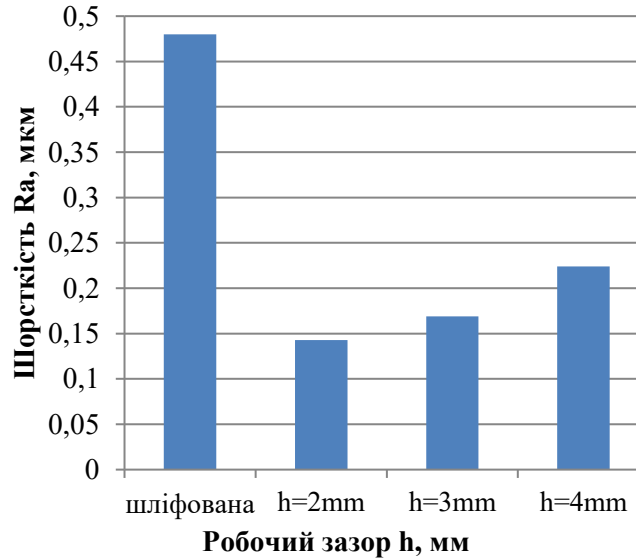
Рис. 3.29 Зовнішній вигляд алмазів в складі алмазних паст типу АСМ: а) АСМ 40/28 мкм; б) АСМ 20/14 мкм; в) АСМ 5/3 мкм; г) АСМ 3/2 мкм

Результати оброблення сумішами сферичних порошків ДЧ 1800/1300 мкм та S330 1400/1000 мкм, оскільки частого Феромап 630/400 мкм із додаванням алмазних паст АСМ 40/28 мкм, АСМ 20/14 мкм, АСМ 5/3 та АСМ 3/2 наведені на рис. 3.30

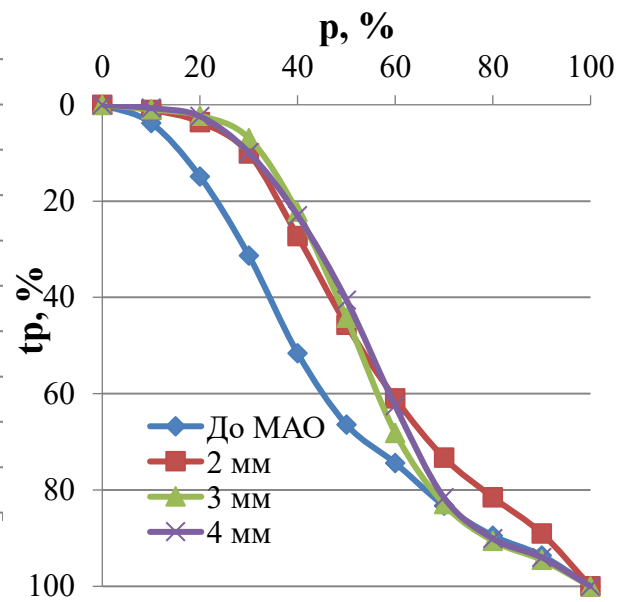
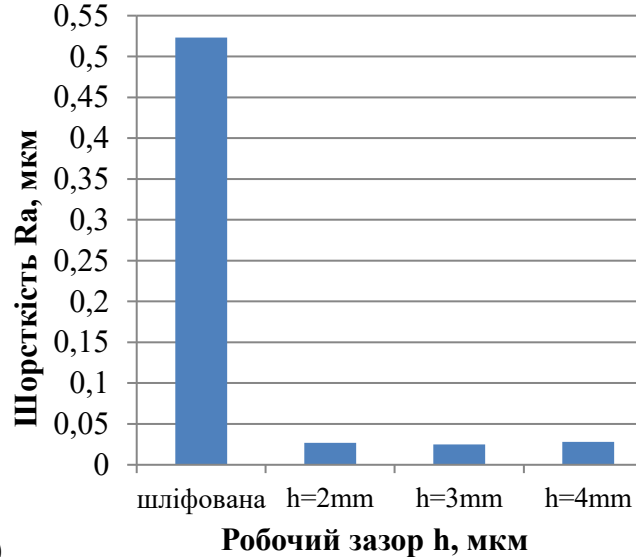


ДЧ 1800/1300 + АСМ 5/3

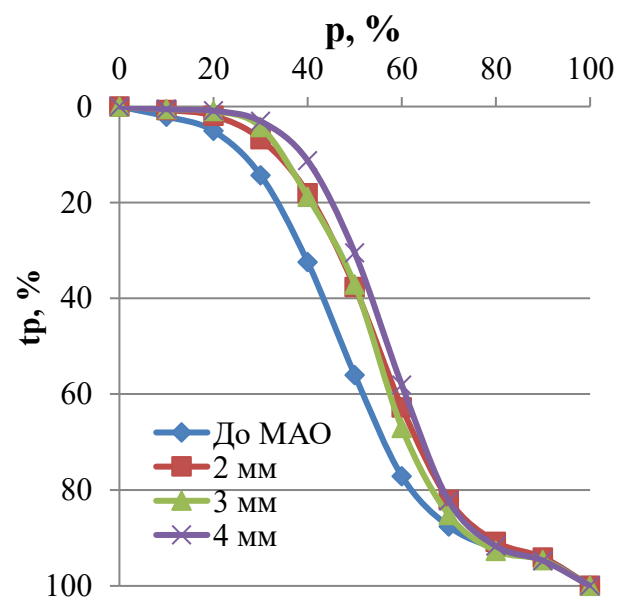
в)

**ДЧ 1800/1300 + АСМ 2/3**

г)

**S330 1400/1000 + АСМ 5/3**

д)



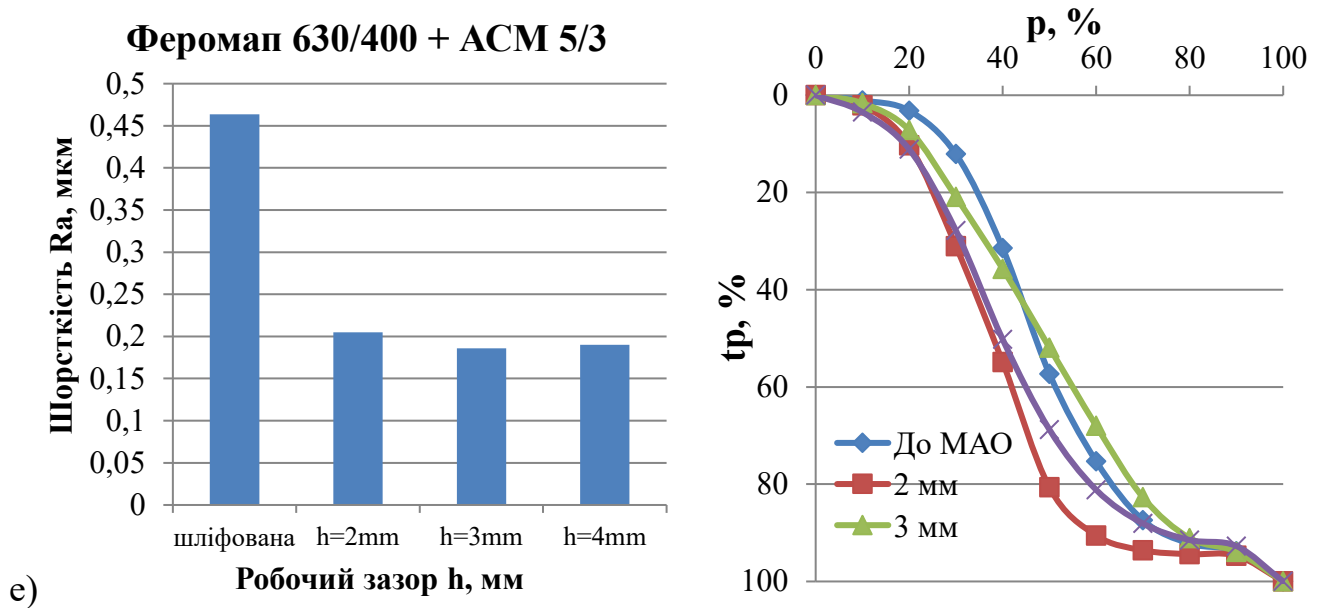


Рис. 3.30 Зміна шорсткості та опорної поверхні після MAO сумішами: а) ДЧ 1800/1300+АСМ40/28; б) ДЧ1800/1300+АСМ20/14; в) ДЧ1800/1300+АСМ5/3; г) ДЧ1800/1300+АСМ2/3; д) S330 1400/1000+АСМ5/3; е) Феромап630/400+АСМ5/3

Збірні гістограми порівняння отриманих результатів MAO сумішшю МАП та алмазних паст наведені на рис. 3.31.

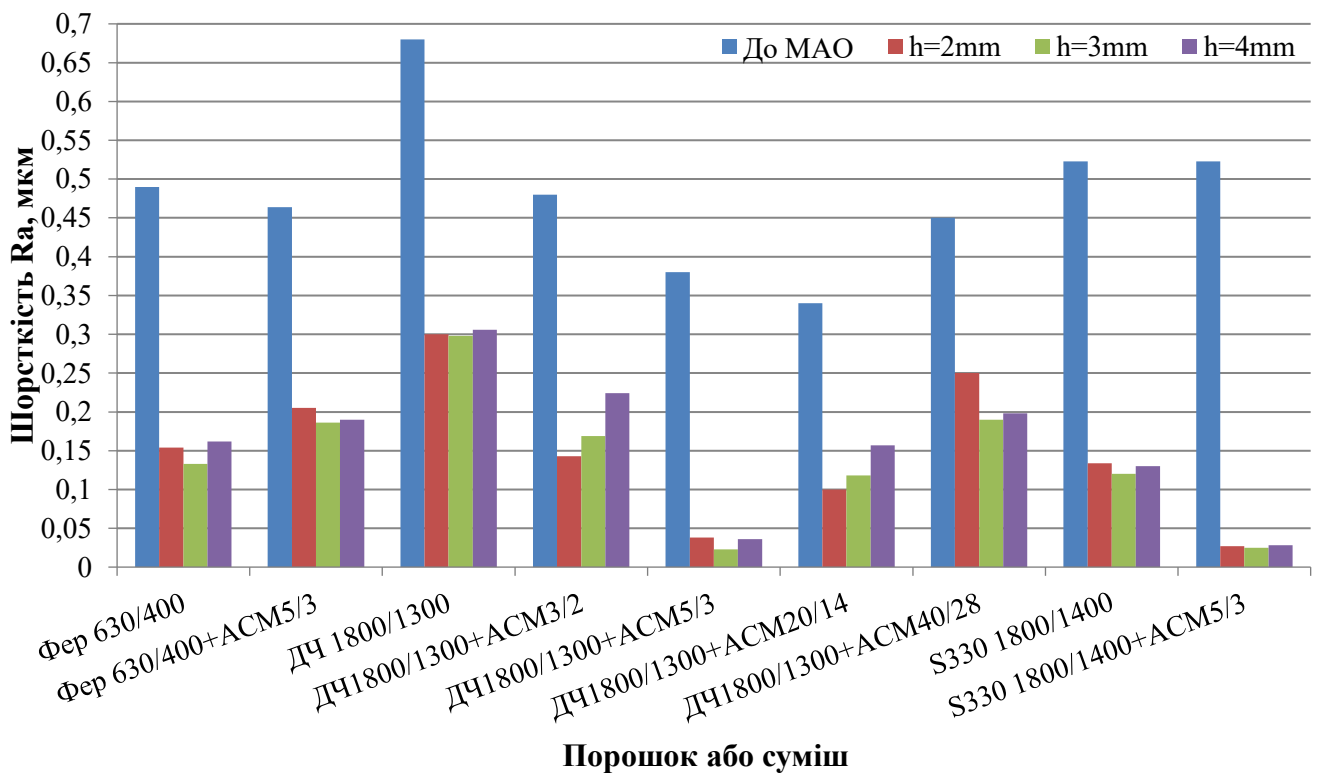


Рис. 3.31 Порівняльна гістограма зміни шорсткості залежно від складу абразиву, що формує МАІ

Встановлено, що найкраща поліруюча здатність МАІ отримується, при формуванні робочого середовища індуктора з порошку ДЧ 1800/1300 мкм з додаванням пасти АСМ 5/3 мкм та S330 1400/1000 в парі з АСМ 5/3 мкм, при цьому спостерігаються кращі результати для порошку S330, це можна пояснити меншим розміром фракції порошку – 1800/1300 мкм у ДЧ та 1400/1000 мкм у S330. Відзначимо, що отримані результати корелюють з даними, наведеними в [3], які було встановлено при виконанні MAO твердих сплавів. Вище значення шорсткості після MAO сумішшю ДЧ+АСМ 3/2 мкм у порівнянні з сумішшю ДЧ+АСМ 5/3 мкм пояснюється меншою абразивною здатністю, що не дозволило отримати шорсткість на рівні 0,03 мкм. Проте збільшення часу оброблення в 2 рази дозволило отримати шорсткість 0,04 мкм за використання ДЧ та АСМ 3/2 мкм. При цьому перехід від мікровиступів до мікрозападин на мікропрофілю змістився з $p = 51\%$ до $p = 62\%$, що відповідає мікропрофілю, отриманому після MAO сумішшю ДЧ+АСМ 5/3 мкм.

3.7 Механізм взаємодії суміші округлих порошків та нерівновісних осколькочастих

Встановлено, що частинки МАП при MAO додатково виконують функції рухомо-скоординованого притира і забезпечують покращення умов передачі силового навантаження на абразивні зерна надтвердих матеріалів під час різання. Схема взаємодії суміші сферичних порошків ДЧ та S330 із розміром фракції 1800/1300 мкм та осколькочастих порошків типу Феромап 630/400 та дрібніших наведено на рис. 3.32.

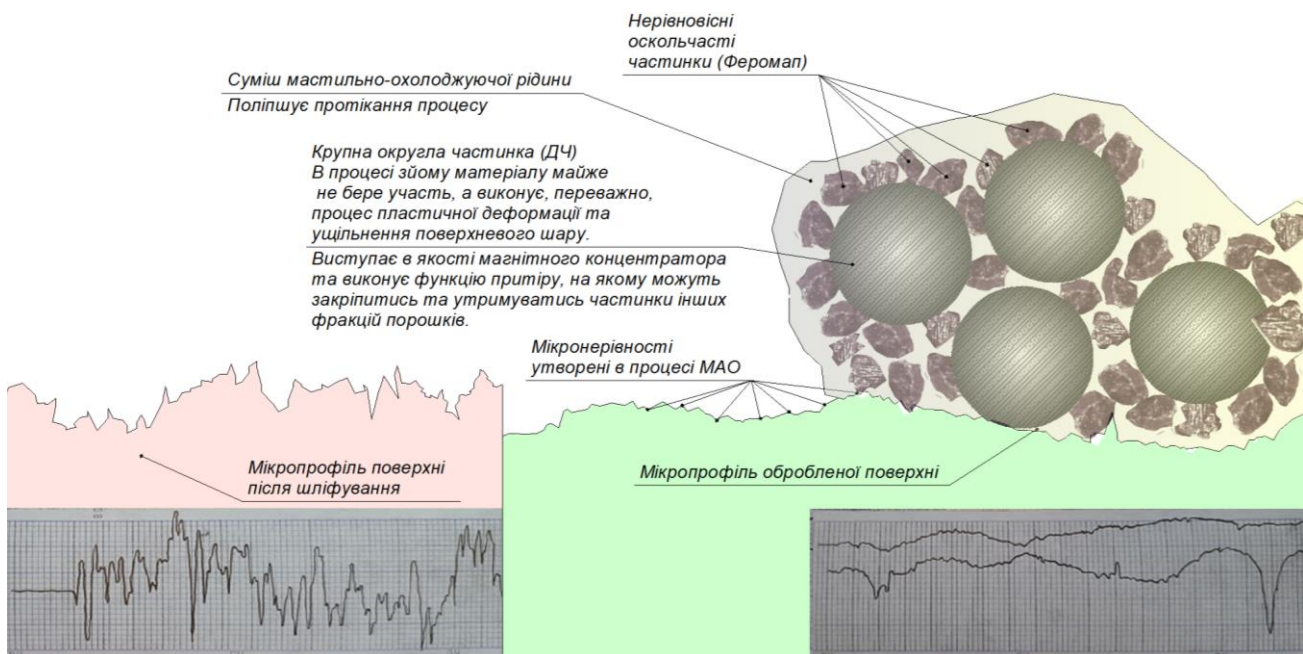


Рис. 3.32 Схематичне зображення взаємодії МАІ сформованого із суміші феромагнітних порошкових матеріалів сферичної – ДЧ (S330) та Феромап осколькочастої форми

Описати взаємодію можна наступним чином – більш крупний сферичний порошок виступає в якості концентратора, до якого закріплюються магнітними силами та утримуються магнітним полем, що генерується із високопотужним неодимовим магнітом в складі індуктора, частинки менших фракцій, в результаті чого спостерігається загальне збільшення абразивної здатності МАП та зменшення шорсткості поверхневого шару оброблюваної деталі. Це пояснюється тим, що сферичний порошок виконує процес пластичної деформації виступів та заминання

впадин, в той час як порошок із нерівномірною формою та гострими кромками виконує функцію видалення матеріалу за рахунок множини різальних кромок.

Схема взаємодії суміші сферичних порошоків ДЧ та S330 із розміром фракції 1800/1300 мкм та оскольчастих немагнітних абразивних алмазних паст типу АСМ та дрібніших наведено на рис. 3.33.

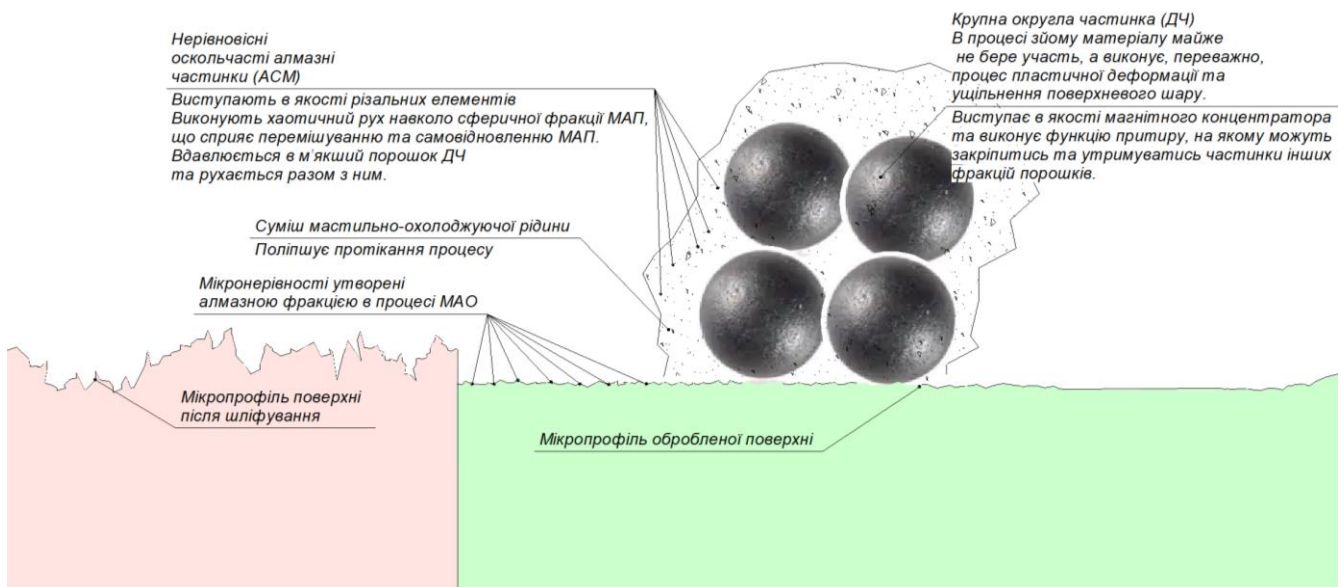


Рис. 3.33 Схематичне зображення взаємодії МАІ сформованого із феромагнітних порошкових матеріалів сферичної форми – ДЧ (S330) та немагнітних абразивних частинок алмазної паст АСМ

У випадку застосування суміші сферичних порошоків та алмазних абразивів, крупний сферичний порошок виступає в якості рухомого притиру, до якого закріплюються шляхом шаржування частинки менших фракцій. Як результат спостерігається збільшення абразивної здатності МАП та зменшення шорсткості поверхневого шару оброблюваної деталі внаслідок впливу сферичного порошку, що виконує пластичну деформацію виступів, заминання впадин та зміцнення приповерхневого шару матеріалу, в той час як алмазна фракція із нерівномірною формою та гострими різальними кромками виконує функцію видалення матеріалу та утворення нових мікронерівностей профілю із значеннями висот, що відповідають граничним значенням абразиву.

Збільшення абразивної здатності пояснюється процесом пластичного деформування поверхневого шару при МАО і як результат збільшення поверхневої твердості.

Найкращі результати, за оцінки по параметру R_a і рівню мікрохвилястості поверхонь зразків після МАО отримано при використанні сумішей округлих ДЧ (1500/1300 мкм) та осколькочастих Феромап(640/400 мкм) порошків при їх рівній кількості в МАІ. За таких умов проведення оброблення округлі крупні порошки, виконують роль рухомого притиру, передаючи силове навантаження на дрібні частинки. При цьому в процесі безпосереднього контакту з оброблюваною поверхнею крупні округлі частинки забезпечують як пластичне деформування мікронерівностей поверхні, так і безпосередньо поверхневого шару зразків, забезпечуючи збільшення поверхневої твердості в 1,4 рази, що створює сприятливі умови для здійснення процесу мікрорізання осколькочастими дрібними частинками. Формування МАІ з порошку ДЧ (1500/1300 мкм) і алмазної пасти АСМ різної зернистості дозволило встановити, що найкраща поліруюча спроможність притаманна МАІ, який сформовано з порошку ДЧ (1500/1300 мкм) з додаванням пасти АСМ (5/3 мкм). При цьому отримано шорсткість оброблених поверхонь з R_a на рівні 0,03 - 0,04 мкм.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Встановлено процеси та явища, що реалізуються при МАО площин індукторами торцевого типу на базі високоенергетичних магнітів та основні технологічні параметри, які безпосередньо впливають на якісні параметри оброблюваних поверхонь, що формуються при взаємодії деталі та МАІ.

2. Вперше із застосуванням комплексного підходу по моделюванню розповсюдження магнітних полів в робочій зоні та результатів експериментальних досліджень із зміною форми робочої торцевої поверхні магнітної головки запропоновано раціональну конструкцію магнітно-абразивного індуктора на базі постійних високоенергетичних магнітів.

3. Висунуто та експериментально підтверджено гіпотезу про взаємодію суміші МАП сферичної та осколької форми як рухомо-скоординований притир, яка базується на аналізі умов формування МАІ, процесів, що їх супроводжують в умовах малих магнітних зазорів.

4. Надано рекомендації щодо технологічних режимів проведення процесу для забезпечення високої ефективності оброблення площин методом МАО головками з високоенергетичними магнітами на верстатах із вертикальним розташуванням шпинделя.

5. Вперше досліджено можливість і доцільність використання різних типів МАП та їх сумішей в умовах малого магнітного зазору для високопродуктивної обробки і показано що в процесі взаємодії між МАІ та деталлю при МАО з урахуванням характеристик оброблюваної деталі та магнітно-абразивних порошків можливо отримання шорсткості поверхні з $Ra < 0,02 \mu\text{m}$, розгладженим профілем і формуванням в поверхневому шарі виробів керованих залишкових від'ємних напружень в діапазоні 40-100 МПа, причому найбільший наклеп і залишкові напруження притаманні процесу оброблення крупним округлим порошком S330 з розміром частинок 1200/900 мкм.

6. Експериментально підтверджено теоретичні припущення, щодо впливу характеристик МАІ при обробленні площин методом МАО головками з

високоенергетичними магнітами та технологічних факторів процесу оброблення на окремі показники параметрів оброблюваних поверхонь, що забезпечило розширення можливостей методу і підвищення його ефективності і продуктивності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Оликер, В. Е. Особенности выбора оптимальной формы частиц магнитно-абразивного порошка / В. Е. Оликер, А. Ф. Жорняк, Т. Я. Гридасова // Порошковая металлургия. – 1983. – № 10. – С. 81–86.
2. Барон Ю. М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов / Ю. М. Барон. – Л.: Машиностроение, 1986. – 176 с.
3. Оликер, В. Е. Порошки для магнитно-абразивной обработки и износостойких покрытий / В. Е. Оликер. – М.: Металлургия, 1990. – 176 с.
4. Läppen - schonend zu hoher Oberflächenqualität URL: <https://www.schleifprofi.com/schleifverfahren/laeppen/>
5. Das Fertigungsverfahren “Läppen” einfach erklärt! URL: <https://www.precifast.de/laeppen/>
6. Böge, A.; Böge, W.: Handbuch Maschinenbau, Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik, 22. Auflage, Berlin, Springer, 2014
7. Evans, C.J.; Paul, E.; Dornfeld, D.; Lucca, D. A.; Byrne, G.; Tricard, M.; Klocke, F.; Dambon, O.; Mullany, B. A.: Material Removal Mechanisms in Lapping and Polishing, in CIRP Annals - Manufacturing Technology 52/2, S. 611-633, 2003
8. Fritz, A.H.: Fertigungstechnik, 12. Auflage, Berlin, Springer, 2018
9. Klocke, F.: Fertigungsverfahren 2, Zerspanung mit geometrisch unbestimmter Schneide, 6. Auflage, Berlin, Springer, S. 341-360, 2018
10. Su, J.; Yuan, J.; Zhang, S.; Lv, B.: Optimization experiment on eccentric lapping of cylindrical rollers, in Nanotechnology and Precision Engineering 1, S. 197-204, 2018
11. Suyang, T.; Yuli, S.; Yuanshuai, L.; Yang, X.; Wenzhuang, L.; Jun, L.; Dunwen, Z.: Study on the influence of ambient temperature on surface/subsurface damage of monocrystalline germanium lapping wafer, in Procedia CIRP 71, S. 435-439, 2018

12. Paucksch, E.; Holsten, S.; Linß, M.; Tikal, F.: Zerspantechnik, Prozesse, Werkzeuge, Technologien, 12. Auflage, Wiesbaden, Vieweg+Teubner Verlag, 2008
13. Kumar, S.; Hiremath, S.: A Review on Abrasive Flow Machining (AFM), in Procedia Technology 25, S. 1297-1304, 2016
14. Jain, V.K.: Magnetic field assisted abrasive based micro-/nano-finishing, in Journal of Materials Processing Technology 209, S. 6022-6038, 2009
15. Сулима А. М., Шулов В. А., Ягодкин Ю. Д. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с
16. Hashimoto, H.; Yamaguchi, H.; Krajnik, P.; Wegener, K.; Chaudhari, R.; Hoffmeister, H.W.; Kuster, F.: Abrasive fine-finishing technology, in CIRP Annals - Manufacturing Technology 65/2, S. 597-620, 2016
17. Майборода В.С. Магнитно-абразивная обработка специальных деталей: дис. ...канд. техн. наук: 05.02.08 / Майборода Виктор Станиславович. – Киев, 1988. – 170 с.
18. 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
19. 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>
20. Акулович Л. М. Технология и оборудование магнитно-абразивной обработки металлических поверхностей различного профиля/ Л.М. Акулович, Л.Е. Сергеев. – Минск : БГАТУ, 2013. – 372 с.

21. Акулович Л. М. Основы магнитно-абразивной обработки металлических поверхностей / Л. М. Акулович, Л. Е. Сергеев, В. Я. Лебедев. – Минск: БГАТУ, 2012. – 316 с.
22. 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
23. Dolinsky, Elperin. Ponderomotive Forces in Liquid Conductors with Macroscopic Solid Inclusions. AIP Publishing, 1994, doi:10.1063/1.357341.
24. 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>.
25. Майборода В.С. Дослідження властивостей магнітно-абразивного інструменту сформованого з сумішей порошків / В.С. Майборода // Процеси механічної обробки в машинобудуванні. Збірник наук. праць ЖДТУ. – Житомир: ЖДТУ, 2009. – Вип.6. – С. 144 – 159.
26. Крымский М.Д. Влияние формы магнитно-абразивных зерен на их режущую способность / М.Д. Крымский. // Порошковая металлургия. – 1983. – №6. – С. 83 – 85.
27. 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.
28. 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.
29. Yüewu 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>
30. 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.
 31. Ткачук І. В. Геометричні характеристики магнітно-абразивних порошків/ І. В. Ткачук, В. С. Майборода // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наук. праць. – Краматорськ, 2014. – Вип. 34 – С. 49 – 55.
 32. Lin, CT., Yang, LD. & Chow, HM. Study of magnetic abrasive finishing in free-form surface operations using the Taguchi method. Int J Adv Manuf Technol 34, 122–130 (2007)
 33. Improvement of Surface Roughness Quality for Stainless Steel 420 Plate Using Magnetic Abrasive Finishing Method. Al-Khwarizmi Engineering Journal, vol. 6, no. 4, Dec. 2010, pp. 10-20, <https://alkej.uobaghdad.edu.iq/index.php/alkej/article/view/508>.
 34. Shukla, Asit and Dr.D. K.Singh. “Modelling and Optimization of Magnetic Abrasive Finishing Process.” International journal of engineering research and technology 2 (2013): n. pag.
 35. Musa, Shakir Mahmud Shakir. Improvement the hardness of stainless steel 321 by magnetic abrasive finishing process. al-Nahrain Journal for Engineering Sciences Vol. 20, no. 4 (2017), pp.838-845. <https://search.emarefa.net/detail/BIM-850742>
 36. Safavi, S. , , Hasnvand, S. , and Jafari Nedoushan, R. . "Experimental investigation of magnetic abrasive polishing of paramagnetic workpieces", Scientia Iranica, 26, 2, 2019, 789-795. doi: 10.24200/sci.2018.20415
 37. Wu, Jinzhong & Zou, Yanhua & Sugiyama, Hitoshi. (2016). Study on finishing characteristics of magnetic abrasive finishing process using low-frequency alternating magnetic field. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 85. 10.1007/s00170-015-7962-9.

38. Zou, Y., Xing, B. & Sun, X. Study on the magnetic abrasive finishing combined with electrolytic process—investigation of machining mechanism. *Int J Adv Manuf Technol* 108, 1675–1689 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05442-3>
39. Kumar R, Komma VR. Development and experimental investigation of magnetic abrasive finishing of 17-4PH steel. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2024;238(10):4463-4476. doi:10.1177/09544062231208554
40. Gusev, V.V., Kucherenko, S.V., Sukhoruchko, K.S., (2011), “Magnetic-abrasive machining of internal surfaces with use of permanent magnets”, *Scientific works of DonNTU*, vol. 8, pp. 145-151.
41. Sihag, Nitesh & Kala, Prateek & Pandey, Pulak. (2015). Chemo Assisted Magnetic Abrasive Finishing: Experimental Investigations. *Procedia CIRP*. 26. 539-543. 10.1016/j.procir.2014.07.067.
42. Jiao, Anyuan & Quan, H. & Li, Z. & Chen, Y.. (2016). Study of magnetic abrasive finishing in seal ring groove surface operations. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 85. 10.1007/s00170-015-8029-7.
43. Babbar, Atul & Singh, Parminderjeet & Farwaha, Harnam. (2017). Regression Model and Optimization of Magnetic Abrasive Finishing of Flat Brass Plate. *Indian Journal of Science and Technology*. 10. 1-7. 10.17485/ijst/2017/v10i31/113860.
44. Kansal, Harsh & Singh, Anant & Grover, Vishwas. (2017). Magnetorheological nano-finishing of diamagnetic material using permanent magnets tool. *Precision Engineering*. 51. 10.1016/j.precisioneng.2017.07.003.
45. Zhao Y, Ratay J, Li K, Yamaguchi H, Xiong W. Effects of Magnetic Abrasive Finishing on Microstructure and Mechanical Properties of Inconel 718 Processed by Laser Powder Bed Fusion. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2022; 6(2):43. <https://doi.org/10.3390/jmmp6020043>
46. Chaurasia, Ankur, and Vishal Wankhede. "Magnetic abrasive finishing of inconel 718 super alloy using permanent magnet." *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)* 5 (2018): 1165-1168.

47. Uddin MS, Santos V, Marian R. Interplay of Process Variables in Magnetic Abrasive Finishing of AISI 1018 Steel Using SiC and Al₂O₃ Abrasives. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2019; 3(2):29. <https://doi.org/10.3390/jmmp3020029>
48. Zelinko A, Welzel F, Biermann D, Maiboroda V. Influence of Process Parameters and Initial Surface on Magnetic Abrasive Finishing of Flat Surfaces on CNC Machine Tools. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2021; 5(4):108. <https://doi.org/10.3390/jmmp5040108>
49. Zelinko, A., Welzel, F., Biermann, D. et al. Tool type and macrostructure for magnetic abrasive finishing of flat surfaces on CNC machine tools. *Prod. Eng. Res. Devel.* 16, 523–533 (2022). <https://doi.org/10.1007/s11740-021-01097-5>
50. Zhao Y, Ratay J, Li K, Yamaguchi H, Xiong W. Effects of Magnetic Abrasive Finishing on the Microstructure and Mechanical Properties of Inconel 718 Processed by Laser Powder Bed Fusion. *Preprints.org*; 2022. DOI: 10.20944/preprints202202.0253.v1.
51. Webb C.E. 1961. “The stability of Permanent Magnets”. *Proceedings of the IEE* 108:317-324. DOI: 10.1049/pi-c.1961.0043
52. O'Handley R.C. 2000. “Modern Magnetic Materials: Principles and Applications”. New York: John Wiley & Sons, Inc. ISBN: 0-471-15566-7
53. Arnold D.P. 2009. “Permanent Magnets for MEMS”. *Journal of microelectromechanical systems* 18:1255-1266. DOI: 10.1109/JMEMS.2009.2034389
54. Chiba A, Fukao T, Ichikawa O, Oshima M, Takemoto M, Dorrell D.G. 2005. “Magnetic Bearings and Bearingless Drives” Oxford: Elsevier. ISBN: 0-7506-5727-8
55. Heikkilä T. 2002. “Permanent magnets synchronous motor for industrial inverter applications – analysis and design” ISBN: 951-764-699-2
56. Zubair Ahmad, Zhongwu Liu, A. ul Haq, Synthesis, magnetic and microstructural properties of Alnico magnets with additives,

- Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Volume 428, 2017, Pages 125-131, ISSN 0304-8853,
<https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2016.12.023>.
57. Zhen Zhao, Haoyang Zhao, Hubin Luo, Lei Liu, Yong Ding, Xiangyu Zhang, Xiaohong Yao, Jian Zhang, Mechanical properties of samarium cobalt: A molecular dynamics study, *Materials Today Communications*, Volume 31, 2022, 103676, ISSN 2352-4928, <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.103676>.
 58. Shuhan Liang, Xiheng Shao, Yongsheng Que, Bing Guo, Huangping Bao, Guocai Tang, Xiangling Yan, Jinsheng Bao, Lijing Yang, Laishun Qin, Kangying Shu, Da Chen, Zhenlun Song, Recent advances in mechanical properties of sintered NdFeB magnets, *Journal of Alloys and Compounds*, Volume 1003, 2024, 175689, ISSN 0925-8388, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.175689>.
 59. Alshits, V.I., Darinskaya, E.V., Koldaeva, M.V. et al. Magnetoplastic effect: Basic properties and physical mechanisms. *Crystallogr. Rep.* 48, 768–795 (2003).
<https://doi.org/10.1134/1.1612598>
 60. Sapkota A, Ghimire SK, Adanur S. A review on fused deposition modeling (FDM)-based additive manufacturing (AM) methods, materials and applications for flexible fabric structures. *Journal of Industrial Textiles*. 2024;54. doi:10.1177/15280837241282110
 61. Bernad SI, Bernad E. Magnetic Forces by Permanent Magnets to Manipulate Magneto-responsive Particles in Drug-Targeting Applications. *Micromachines* (Basel). 2022 Oct 25;13(11):1818. doi: 10.3390/mi13111818.
 62. Leonov, S.L., Ikonnikov, A.M., Grebenkov, R.V., (2017), “Calculation of magnetic induction in the working gap during magneto-abrasive machining of flat surfaces of workpieces made of ferromagnetic and non-magnetic materials with permanent magnet inductors”, *Technological Equipment, Machining Attachments and Instruments*, vol. 4, pp. 49–54
 63. Магнітно-абразивна обробка плоских поверхностей головками на постійних магнітах / В. С. Майборода та ін. *Технічна інженерія*. 2020. № 1(85). С. 60–65. URL: [https://doi.org/10.26642/ten-2020-1\(85\)-60-65](https://doi.org/10.26642/ten-2020-1(85)-60-65)

64. AISI 1045 Steel Flat Surfaces Machining Using the MagnetoAbrasive Method / V. S. Maiboroda et al. Journal of Engineering Sciences. 2020. Vol. 7, no. 1. P. A1–A7. URL: [https://doi.org/10.21272/jes.2020.7\(1\).a1](https://doi.org/10.21272/jes.2020.7(1).a1)
65. Flat surfaces machining by the magneto-abrasive method with permanent magnet end-type heads 3. The influence of the types of the working heads on the effectiveness of the magneto-abrasive machining / V. Maiboroda et al. Mechanics and Advanced Technologies. 2021. Vol. 5, no. 1. P. 97–102. URL: <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2021.5.1.229813>
66. Flat surfaces machining by the magneto-abrasive method with permanent magnet end-type heads. The influence of the design of the working surfaces of the heads on the effectiveness of the magneto-abrasive machining / V. Maiboroda et al. Mechanics and Advanced Technologies. 2020. No. 3(90). URL: <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2020.0.208535>
67. Maiboroda V., Dzhulii D., Zelinko A. Flat surfaces machining by the magneto-abrasive method with permanent magnet end-type heads 1. The influence of the type of magneto-abrasive powder on the effectiveness of the magnetoabrasive machining. Mechanics and Advanced Technologies. 2020. Vol. 89, no. 2. 75 URL: <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2020.89.202696>
68. Ikonnikov, A.M, Leonov, S.L., Grebenkov, R.V., Kulavik, A.A., (2018), “Analysis of magnetic forces in the working clearance with magnetic-abrasive treatment of inductors on standing magnets”, Journal of Modern Technologies, vol. 3(11), pp. 27–32.
69. V. S. Antoniuk, " Basics of increasing the performance of cutting tools by forming wear-resistant coatings of a discrete type ", Dr. dissertation, Dept. Mech. Eng., National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine, 2006.
70. Ульяненко Н. В. Підвищення працездатності твердосплавного інструменту шляхом застосування магнітно-абразивного оброблення та нанесення зносостійких покриттів: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01. Київ, 2006. 160 с.

71. Буріков О.О., Джулій Д.Ю., Майборода В.С. Магнітно-абразивне оброблення плоских поверхонь зразків зі сталі 40Х торцевими індукторами на основі постійних магнітів. Процеси механічної обробки, верстати та інструмент. Збірник наукових праць XII Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю м. Житомир, 9–10 листопада 2023 р.с.53-56