

Формування мікропрофілю поверхонь виробу при магнітно-абразивному обробленні площин головками на базі високоенергетичних постійних магнітів

В. С. Майборода¹ • Д. Ю. Джулій¹ • О. О. Буріков¹ • О. О. Беляєв²

Received: 8 February 2025 / Revised: 5 March 2025 / Accepted: 17 March 2025

Анотація. Виконані експериментальні дослідження по можливості застосування для магнітно-абразивного оброблення плоских поверхонь феромагнітних деталей торцевими головками на базі постійних неодимових магнітів сумішею порошків, які складаються з крупних і дрібних частинок різної форми і алмазних паст. Показано, що при використанні сумішею з порошків осколької форми отримано зниження шорсткості поверхонь з вихідної шорсткості $Ra = 0,8$ мкм до $0,125$ мкм з розподіленим мікропрофілем, причому найкращі результати мають місце у випадку коли кількість дрібної фракції в сумішах не перевищує 40 %. Використання сумішею округлих порошків з розміром частинок $1700/1200$ мкм і осколької частинок $640/400$ мкм при їх рівній кількості в магнітно-абразивному інструменті дозволили після магнітно-абразивного оброблення сформувати поверхню з величиною шорсткості $Ra = 0,1$ мкм. Встановлено, що 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 осколької дрібними частинками. При формуванні магнітно-абразивного інструменту з крупних округлих частинок і алмазної пасті різної зернистості встановлено, що найкращу поліруючу здатність має суміш, яка сформована з округлого порошку з розміром частинок $1500/1300$ мкм з додаванням алмазної пасті зернистістю $5/3$ мкм. Параметр шорсткості Ra оброблених поверхонь із застосуванням таких сумішею становить $0,03–0,04$ мкм.

Ключові слова: магнітно-абразивне оброблення, магнітно-абразивний інструмент, мікропрофіль поверхні, плоска поверхня, суміш, постійний магніт, торцева головка.

Вступ

Застосування головок торцевого типу з постійними неодимовими магнітами при поліруванні плоских поверхонь є досить перспективним, особливо в разі їх використання на верстатах з ЧПК [1]. Виконані попередні дослідження показали, подібний метод фінішного оброблення дозволяє отримувати шорсткість поверхонь з $Ra < 0,1$ мкм [2]–[5]. Встановлено вплив режимів оброблення [6], стану попереднього оброблення [7] на кінцевий результат, отриманий після маг-

нітно-абразивного полірування. З метою розширення методу магнітно-абразивного оброблення (МАО), а саме абразивної і поліруючої здатності магнітно-абразивного інструменту (МАІ), який формується в робочих зазорах досліджено застосування сумішею порошків різних типів, з різною формою і розміром частинок [8]. Показано, що існує безпосередній зв'язок між триботехнічними властивостями сумішею з яких формується МАІ і його експлуатаційними характеристиками. Встановлено, що найкраща поліруюча спроможність МАІ, сформованого з сумішею порошкових матеріалів притаманна крупним округлим порошкам з розмірами частинок більше 630 мкм з додаванням дрібних осколької. Проте наведені дослідження стосуються умов МАО у великих магнітних зазорах [9] і потребують додаткового уточнення для малих магнітних зазорів, які використовують при МАО площин торцевими головками з постійними високопотужними магнітами.

✉ Д. Ю. Джулій
dmytro.dzhulii@gmail.com

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

² ZOM Oberflächenbearbeitung GmbH, Магдебург, Німеччина

Відомі дослідження про використання при MAO сумішей магнітно-абразивних порошоків (МАП) і абразивних паст з надтвердих матеріалів, таких як твердий сплав, технічна кераміка, загартовані і інструментальні матеріали, інструмент з швидкорізальної сталі [10], [11]. При цьому вважається, 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. Але відсутня чітка інформація про вплив розмірів і форми частинок МАП, зернистості абразивних паст з надтвердих матеріалів на мікрогеометрію і показники шорсткості оброблених методом MAO поверхонь торцевими головками з високопотужними постійними магнітами.

Метою роботи було дослідження можливостей застосування МАІ, сформованого з сумішей МАП з різною формою і розміром частинок і дослідження впливу алмазних паст різної зернистості на шорсткість і мікрогеометрію плоских поверхонь після MAO інструментом у вигляді торцевих головок на базі високопотужних постійних магнітів шліфованих зразків зі сталі 40Х.

Магнітно-абразивному обробленню піддавали плоскі зразки після алмазного шліфування до рівня шорсткості $R_a = 0,5\text{--}0,7$ мкм. MAO виконували при частоті обертання головок 900 об/хв., подачі 20 мм/хв. при робочих зазорах 2–4 мм [2]–[4]. З врахуванням результатів попередніх досліджень [7], [8], [12]–[14] при формуванні МАІ з сумішей МАП використовували оскольчасті порошки Феромап з розмірами частинок 630/400 і 200/100 мкм, округлі порошки ДЧ (дріб чавунна) з розміром частинок 1500/1300 мкм, S330 фракції 1700/1200 мкм і Полімам-М – 400/315 мкм. При формуванні сумішей з метою підвищення їх поліруючих властивостей додатково використовували алмазні пасти марки АСМ з зернистістю 3/2, 5/3, 20/14 та 40/28 мкм.

Дослідження впливу складу сумішей з крупних і дрібних оскольчастих порошоків Феромап на зміну після MAO параметру шорсткості – R_a показали, що мінімальне значення R_a формується після MAO порошком Феромап фракції 630/400 мкм без додавання дрібного МАП з розміром 200/100 мкм (рис. 1). Проте аналіз зміни величини відносної опорної довжини профілю поверхні t_p від рівня перетину p (рис. 2) показав, що на фоні зниження параметра R_a більш розполірований мікропрофіль з меншою кількістю мікроставів і меншою мікрохвилястістю формується при використанні МАІ з сумішей порошоків, в яких кількість дрібної фракції не перевищує 40 %.

Встановлено, що застосовані суміші МАП для MAO забезпечують зниження рівня мікрохвилястості поверхні. Про це свідчать і розташування зон на залежностях зміни величини t_p від рівня перетину p де відбувається перехід від мікроставів до мікрозападин профілю поверхонь [15]. Наприклад, для сумішей порошоків Феромап з розміром частинок 630/400 та 200/100 мкм

розташування зазначених зон зміщується від відносного рівня перетину $p = 25,5$ % після MAO порошком з розміром частинок 630/400 мкм до рівня $p = 50$ % при використанні сумішей порошоків з розміром частинок 630/400 і 200/100 мкм за умов зростання вмісту відносної кількості дрібної фракції – 200/100 мкм і суміші до 0,4. Отримані данні підтверджують результати досліджень триботехнічних властивостей МАІ з сумішей порошоків і вплив складу МАІ на їх експлуатаційні властивості [8]. Встановлено, що величина робочого зазору практично не впливає на величину R_a , яку отримано після MAO, що пов'язано з величиною зерна крупної фракції.

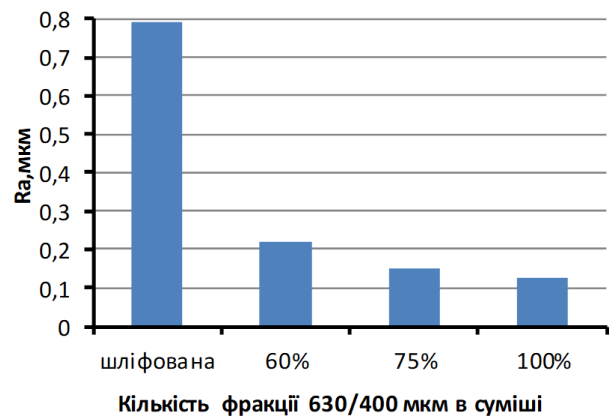


Рис. 1. Зміна параметра R_a в залежності від кількості порошку Феромап з розміром частинок 630/400 мкм в суміші після MAO

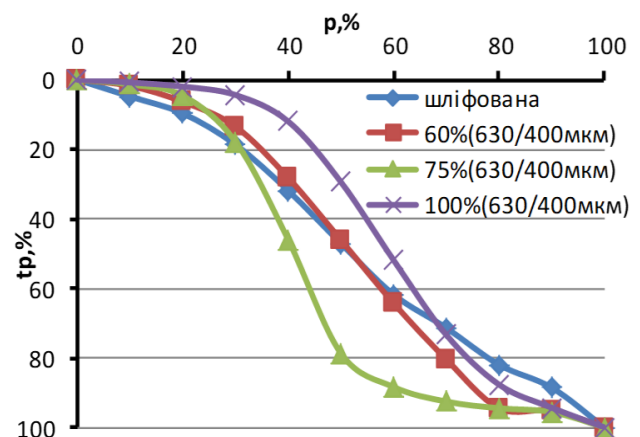


Рис. 2. Зміна величини відносної опорної довжини профілю поверхні t_p від рівня перетину p після MAO сумішами МАП з різним вмістом порошку Феромап зернистістю 630/400 мкм

Використання при MAO магнітно-абразивного інструменту сформованого з сумішей крупних округлих частинок порошку ДЧ (1500/1300 мкм) з дрібнішими оскольчастими частинками порошку Феромап з розмірами частинок 630/400, 315/200 та 200/100 мкм

дозволило, за умов оброблення з різними робочими зазорами в діапазоні 3–5 мм, встановити, що як і у випадку використання сумішей з оскольчастими МАП величина робочого зазору в зазначеному діапазоні розмірів не впливає на кінцевий результат, що підтверджує попередні результати досліджень [2]. Отримані результати зміни параметру Ra від складу сумішей наведено на рис. 3.

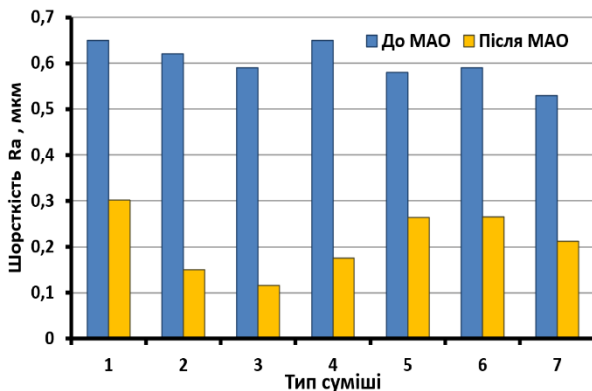


Рис. 3. Зміна шорсткості поверхні після MAO сумішами МАП різного складу: 1 – ДЧ(1500/1300 мкм) 100 %, 2 – Феромап(630/400 мкм) 100 %, 3 – ДЧ(1500/1300 мкм) 50 %+ Феромап(630/400 мкм) 50 %, 4 – ДЧ(1500/1300 мкм) 33 %+ Феромап(630/400 мкм) 67 %, 5 – ДЧ(1500/1300 мкм) 50 %+ Феромап(315/200 мкм) 50 %, 6 – ДЧ(1500/1300 мкм) 50 %+ Феромап(200/100 мкм) 50 %, 7 – ДЧ(1500/1300 мкм) 67 %+ ПР Р6М5(200/100 мкм) 33 %

Як і у випадку використання сумішей порошоків з осколькою формою частинок при формуванні МАІ величина робочого зазору в зазначеному діапазоні розмірів не впливає на кінцевий результат, що підтверджує результати попередніх досліджень [2]. Показано, що найкращі результати отримано при використанні сумішей округлих порошоків ДЧ (1500/1300 мкм) і осколькою Феромап (640/400 мкм) при їх рівній кількості в МАІ. За таких умов оброблення округлі крупні порошки, які мають значно більший об'єм і масу частинок і відповідно більшу намагніченість, виконують роль рухомого притиру, передають 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 [12], що забезпечує сприятливі умови для здійснення процесу мікрорізання осколькою порошками з меншими реальними радіусами різальних кромок. Підтвердженням процесу пластичного деформування поверхневого шару при MAO є результати збільшення поверхневої твердості в 1,4 рази. Причому рівень стискаючих залишкових напружень, визначений за методикою наведеною в [16] склав 165 ГПа.

Формування МАІ з порошку ДЧ (1500/1300 мкм) і алмазної пасті АСМ різної зернистості – 3/2, 5/3, 20/14 та 40/28 мкм дозволило після MAO за режимами оброблення наведеними вище отримати значення шорсткості поверхонь – Ra наведені на рис. 4.

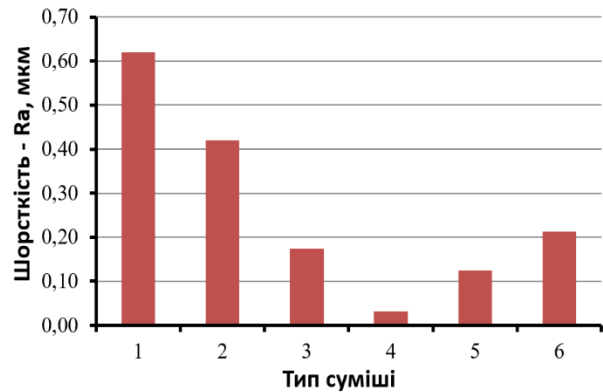


Рис. 4. Зміна шорсткості поверхні після MAO сумішами ДЧ(1500/1300 мкм) з алмазними пастами АСМ різної зернистості: 1 – До MAO, 2 – ДЧ(1500/1300 мкм) без АСМ, 3 – ДЧ+АСМ (3/2 мкм), 4 – ДЧ+АСМ(5/3 мкм), 5 – ДЧ+АСМ(20/14 мкм) і 6 – ДЧ+АСМ(40/28 мкм)

Встановлено, що найкраща поліруюча спроможність притаманна МАІ, який сформовано з порошку ДЧ (1500/1300 мкм) з додаванням пасті АСМ (5/3 мкм). Відзначимо, що отримані результати співпадають з даними, наведеними в [11], які було встановлено при MAO твердих сплавів. Більша шорсткість після MAO сумішню ДЧ+АСМ (3/2 мкм) у порівнянні з сумішню ДЧ+АСМ (5/3 мкм) пов'язана з меншою її абразивною здатністю, що не дозволило отримати шорсткість на рівні 0,03 мкм. Проте збільшення в 2 рази часу MAO дозволило вийти на шорсткість 0,04 мкм. При цьому перехід від мікрорізів до мікрозападин на мікропрофіль змістився з $p = 51\%$ до $p = 62\%$, що відповідає мікропрофілю, отриманому після MAO сумішню ДЧ+АСМ 5/3 мкм.

Висновки

Дослідження можливостей застосування МАІ, сформованого з сумішей МАП з різною формою і розміром частинок показали, що для сумішей з крупних і дрібних осколькою порошоків Феромап мінімальне значення параметра Ra формується після MAO порошком Феромап фракції 630/400 мкм без додавання дрібного МАП з розміром 200/100 мкм, проте аналіз зміни величини відносної опорної довжини профілю поверхні t_p від рівня перетину r свідчить про те, що на фоні зниження параметра Ra з 0,8 мкм до 0,125 мкм, більш розполірований мікропрофіль з меншою кількістю мікрорізів і меншою мікрохвилястістю формується при використанні МАІ з сумішей порошоків, в яких кі-

лькість дрібної фракції не перевищує 40 %. Найкращі результати щодо параметру Ra і рівня мікрохвилястості поверхонь зразків після MAO отримано при використанні сумішей округлих порошоків ДЧ (1500/1300 мкм) і осколькочастих Феромап (640/400 мкм) при їх рівній кількості в МАІ. За таких умов 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 здатність притаманна МАІ, який сформовано з порошку ДЧ (1500/1300 мкм) з додаванням пасти АСМ (5/3 мкм). При цьому отримано шорсткість оброблених поверхонь з величиною Ra на рівні 0,03–0,04 мкм.

References

- [1] A. I. Zelinko, “Magnetabrasives Polieren auf Bearbeitungszentren”, Dr.Ing. dissertation, *Dept. Mech. Eng.*, Dortmund Univ., Dortmund, Germany, 2022.
- [2] V. S. Maiboroda et al, “AISI 1045 steel flat surfaces machining using the magneto-abrasive method”, *Journal of Engineering Sciences*, vol. 7, no. 1, pp. A1-A7, Feb, 2020, doi: [https://doi.org/10.21272/jes.2020.7\(1\).a1](https://doi.org/10.21272/jes.2020.7(1).a1).
- [3] V. Maiboroda, D. Dzhulii, and A. Zelinko, “Flat surfaces machining by the magneto-abrasive method with permanent magnet end-type heads I. The influence of the type of magneto-abrasive powder on the effectiveness of the magneto-abrasive machining”, *Mech. Adv. Technol.*, No. 2(89), Sep. 2020, doi: <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2020.89.202696>.
- [4] V. Maiboroda, D. Dzhulii, A. Zelinko, and A. Burikov, “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”, *Mech. Adv. Technol.*, No. 3(90), pp. 73–81, Dec. 2020, doi: <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2020.0.208535>.
- [5] A. Zelinko et al, “Tool type and macrostructure for magnetic abrasive finishing of flat surfaces on CNC machine tools”, *Production Engineering*, Vol. 16, No. 4, pp. 523–533, Aug, 2022, doi: <https://doi.org/10.1007/s11740-021-01097-5>.
- [6] V. S. Maiboroda et al, “Magnetic abrasive machining of flat surfaces with permanent magnet heads”, *Tekhnichna Inzheneriia*, Vol. 85, No.1, pp. 60–65, June, 2020, doi: [https://doi.org/10.26642/ten-2020-1\(85\)-60-65](https://doi.org/10.26642/ten-2020-1(85)-60-65).
- [7] V. S. Maiboroda et al, “Features of magnetic-abrasive processing of flat surfaces of ferromagnetic parts with end heads based on high-power magnets”, in *Heavy Mechanical Engineering. Problems and Development Prospects: Proceedings of the XXII International Scientific and Technical Conference, ISTC 2024, Kramatorsk-Ternopil, Ukraine, May 28–30, 2024*. V. D. Kovalov, Eds. Kramatorsk: DDMA, 2024, pp. 128–131.
- [8] V. S. Maiboroda, “Fundamentals of creation and use of powder magneto-abrasive tool for finishing of shaped surfaces”, Dr. dissertation, *Dept. Mech. Eng.*, National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine, 2001.
- [9] V. S. Maiboroda, I. V. Slobodyanyuk, D. Yu. Dzhulii, *Magneto-abrasive machining of parts with complex shape*. Zhitomir: PP “Ruta”, 2017.
- [10] I. V. Tkachuk, “Formuvannya mahnitno-abrazyvnoho instrumentu zi stabilnymy vlastyvostyamy v robochykh zazorakh kiltsevoho typu”, Ph.D. dissertation, *Dept. Mech. Eng.*, National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine, 2015.
- [11] V. E. Olikier, *Powders for magneto-abrasive machining and wear resistant coatings*, Metallurgy, Moscow, 1990.
- [12] O. O. Burikov, D. Yu. Dzhulii, V. S. Maiboroda, “Magnetic-abrasive processing of flat surfaces of 40X steel samples with end inductors based on permanent magnets”, in *Machining processes, machines and tools: Proceedings of the XII All-Ukrainian Scientific and Technical Conference with International Participation, ASTCIP 2023, Zhytomyr, Ukraine, November 9–10, 2023*, O.A. Shyshkova, Eds. Zhytomyr: ZSTU, 2023 pp. 53–56.
- [13] V. S. Maiboroda et al “The influence of magnetic-abrasive machining modes on the roughness of flat surfaces”, in *Comprehensive quality assurance of technological processes and systems: Proceedings of the VIII international scientific and practical conference, ISPC 2018, Chernihiv, Ukraine, 2018*, A.M. Yeroshenko, Eds. Chernihiv: CNTU 2018, pp. 139–141.
- [14] V. S. Maiboroda, “Doslidzhennja vlastyvostej maghnitno-abrazyvnogho instrumentu, sformovanogho z dvokhfrakciinykh sumishej poroshkiv pry maghnitno-abrazyvniy obrobcu u velykykh maghnitnykh shhilynakh”, *Tekhnologichni systemy*, №1(37), pp. 40–55, 2007, doi: [https://doi.org/10.1016/S0300-7073\(07\)70906-4](https://doi.org/10.1016/S0300-7073(07)70906-4).
- [15] N. V. Ulyanenko (2006), *Increase of efficiency hard-alloy cutting tackle by magneto-abrasive treatment application and wear-resistant coating*, Ph.D., National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”.
- [16] O. Burikov, D. Dzhulii, and V. Maiboroda, “Influence of magneto-abrasive machining on the characteristics of the surface layer of flat parts”, *Mech. Adv. Technol.*, Vol. 6, No. 3, pp. 286–292, Dec. 2022, doi: <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2022.6.3.265948>.

Formation of a microprofile of product surfaces during magneto-abrasive finishing of planes with heads based on high-energy permanent magnets

V. Maiboroda¹ • D. Dzhulii¹ • O. Burikov¹ • O. Belajev²

¹ Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine

² ZOM Oberflächenbearbeitung GmbH, Magdeburg, Germany

Abstract. Experimental studies have been carried out on the possibility of using powder mixtures consisting of large and small particles of various shapes and diamond pastes for magneto-abrasive finishing of flat surfaces of ferromagnetic parts with end heads based on permanent neodymium magnets. It was shown that when using mixtures of powders of shattered shape, the decrease in surface roughness had been obtained from the initial roughness $Ra = 0.8 \mu\text{m}$ to $0.125 \mu\text{m}$ with a polished microprofile, and the best results occur when the amount of fine fraction in the mixtures does not exceed 40 %. The use of mixtures of rounded powders with a particle size of $1700/1200 \mu\text{m}$ and shattered shape particles of $640/400 \mu\text{m}$ at their equal amount in the magneto-abrasive tool made it possible to form a surface with a roughness value of $Ra = 0.1 \mu\text{m}$ after magneto-abrasive finishing. It has been determined that rounded coarse powders act as a moving lapping tool, transferring the force load to small particles. At the same time, in the process of direct contact with the finished surface, large rounded particles provide both plastic deformation of the surface micro-irregularities and directly of the surface layer of the samples, providing an increase in surface hardness by 1.4 times, which creates favorable conditions for the micro-cutting process with shattered small particles. When forming the magneto-abrasive tool from large rounded particles and diamond paste of different grain sizes, it was found that the best polishing ability is provided by the mixture formed from rounded powder with a particle size of $1500/1300 \mu\text{m}$ with the addition of diamond paste with a grain size of $5/3 \mu\text{m}$. The roughness parameter Ra of the surfaces being finished using such mixtures is $0.03\text{--}0.04 \mu\text{m}$.

Keywords: magneto-abrasive finishing, magneto-abrasive tool, surface microprofile, flat surface, mixture, permanent magnet, end head.
