

# Вплив магнітно-абразивного оброблення на характеристики поверхневого шару плоских деталей

О.О.Буріков<sup>1</sup> • Д.Ю. Джулій<sup>1</sup> • В.С. Майборода<sup>1</sup>

Received: 19 October 2022 / Accepted: 14 November 2022

**Анотація.** В роботі представлено дослідження впливу процесу магнітно-абразивного оброблення (МАО) на характеристики поверхневих шарів плоских поверхонь деталей із феромагнітного матеріалу У9 при обробленні торцевими головками на базі високопотужних постійних магнітів, що формують магнітно-абразивний інструмент типу “цітка”. Для оцінки впливу процесу магнітно-абразивного оброблення на поверхневий шар проаналізовано параметри поверхневої твердості після оброблення дослідних зразків різними порошками та за різних режимів. Досліджено ступінь впливу МАО на поверхню як за твердістю поверхневого шару, так і за деформацією дослідних зразків за рахунок стискаючих залишкових напружень, що виникають в результаті оброблення. Оцінку стану поверхневого шару виконували за зміною твердості після оброблення, величиною ступеню наклепу, в деякій мірі за параметрами шорсткості. Контроль зміни внутрішніх залишкових напружень, що формуються в поверхневих шарах дослідних зразків внаслідок взаємодії частинок порошку із поверхнею під час оброблення виконували по ступеню їх деформування після МАО. Виявлено, що внаслідок МАО у приповерхневому шарі матеріалу зразків виникають внутрішні стискаючі напруження, які становлять 30–100 МПа, при цьому величина напружень змінювалась за оберненою залежністю, тобто при збільшенні величини робочого зазору в переважній більшості випадків спостерігалось зменшення величини напружень. Показано, що глибина зміцненого шару при різних умовах оброблення становить до 200 мкм і більше, а коефіцієнт зміцнення варіюється в межах від 10 до 40%.

**Ключові слова:** магнітно-абразивне оброблення, магнітна головка торцевого типу, шорсткість, напруження, твердість, поверхневий шар.

## Вступ

Фінішне оброблення виробів як з плоскими, так і фасонними поверхнями виконується не тільки для забезпечення відповідного стану мікрогеометрії, а і певних характеристик поверхневого шару до яких відносяться величина і градієнт розповсюдження внутрішніх напружень, поверхнева та об'ємна твердість, стан та зміни макро- і мікроструктури поверхневих шарів матеріалу виробів – параметрів, що суттєвим чином впливають на експлуатаційні властивості. Одним з перспективних методів фінішного оброблення є метод магнітно-абразивного оброблення, який за результатами взаємодії абразивного матеріалу з поверхнею де-

талей поєднує в собі як ударний, так і фрикційний вплив в поєднанні з дією сил магнітного поля.

У науково-технічній літературі наведені окремі результати досліджень зміни характеристик поверхневих шарів виробів після МАО. Так в [1] відзначено, що магнітно-абразивне полірування змінює поверхневу структуру металу, твердість та внутрішні напруження приповерхневого шару, що підтверджено в [2–4]. Зміни мікроструктури спостерігаються для загартованих вуглецевих сталей, так структура сталі марки У10А після загартування, низького відпуску та шліфування для видалення нагару, представляла собою пластинчастий мартенсит з рідкісними великими зернами карбіду заліза. Карбіди пластинчастої форми внаслідок МАО, змінили свої параметри і перейшли у форму дрібних округлих зерен, що були рівномірно розподілені по всій площі косоного шліфа [5]. Також відмічено, що твердість збільшується ближче до поверхні. Причому, чим більшою була зернистість магнітно-абразивного

✉ О.О. Буріков  
Aleksyburikov@ukr.net

<sup>1</sup> КІП ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

порошку при поліруванні, тим глибше від поверхні поширюється зміцнена область. В [6] наведено зміну залишкових напружень в деталі виготовленій за допомогою адитивного виробництва селективним лазерним плавленням. Хоча видалення значного шару матеріалу не було зафіксовано, оброблення призвело до значної зміни залишкових напружень, розтягуючі напруження змінилися стискаючими, величина яких збільшувалася зі збільшенням часу оброблення. Використання MAO дозволило зменшити анізотропію залишкових напружень. Аналогічні дослідження, але з використанням інтенсифікуючих факторів, таких як, вібрація [7] та ультразвуковий вплив [8] також підтверджують, що внаслідок ударно-фрикційної взаємодії частинок магнітно-абразивного інструменту із оброблюваною поверхнею відбувається зміцнення приповерхневого шару та зміна поверхневих напружень. У [9] та [10] доведена доцільність використання як крупнофракційних магнітно-абразивних осколкових порошків, так і порошків, що мають форму частинок наближену до сфери. Проте інформації про характер зміни поверхневої твердості та напруженого стану в поверхневих зонах оброблюваних плоских поверхнях не надається.

### Метою роботи

Було провести оцінку впливу магнітно-абразивного оброблення плоских поверхонь індукторами на базі постійних магнітів високої потужності на стан поверхневого шару оброблюваного матеріалу.

Експериментальні дослідження проводили на зразках у вигляді пластин з розмірами  $70 \times 5 \times 0,8$  мм зі сталі У9. Вибір матеріалу зразків для подальших досліджень пояснюється тим фактом, що сталь У9 – це високовуглецева сталь схильна до наклепу [3], використовується для виготовлення зразків-свідків при визначенні впливу різноманітних методів поверхневого оброблення на характер зміцнення поверхні, зміну фізико-механічних характеристик поверхневих шарів різноманітних виробів.

Попередньо для зняття напружень, що сформувались при виготовленні зразків було виконано їх термооброблення – відпал із подальшим видаленням нагару. MAO зразків виконувалося на фрезерному верстаті головкою типу “щітка” (1) [11] (рис. 1). Враховуючи попередні дослідження [9, 14–16] оброблення виконувалося зі швидкістю обертання шпинделя 900 об/хв та подачею 10 мм/хв зі зміною величини робочих зазорів (в діапазоні 3–5 мм). В якості змащувально-охолоджуючого технічного середовища у всіх випадках використовувалась олива марки Асфол. З метою усунення крайових ефектів і запобігання заокруглення торцевих кромки зразків (2) при MAO їх встановлювали в спеціальні феромагнітні контейнери (3). Контейнер представляє собою пластину виготовлену з масивної феромагнітної плити з двома затискачами з пазом, який за

глибиною співпадає з товщиною зразків, а по ширині дорівнює ширині зразків.

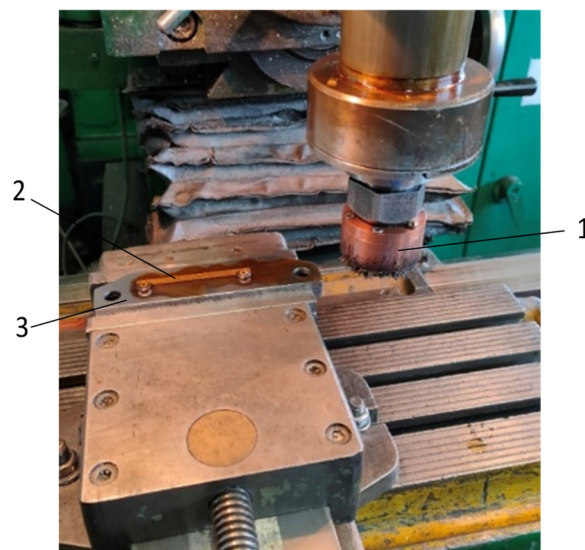
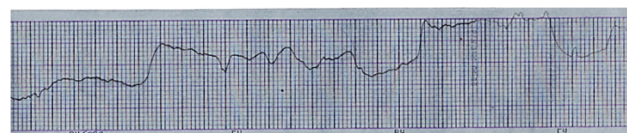
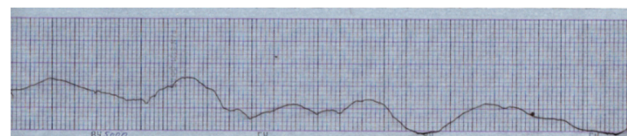


Рис. 1. Схема оброблення зразків

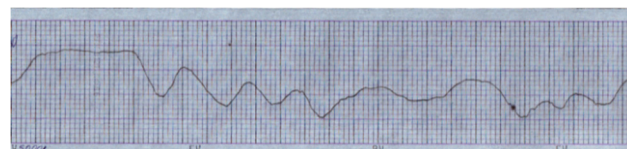
Для MAO використовували магнітно-абразивні порошки виду: осколковий рівновісний Феромап 630/400 мкм, округлий рівновісний S330 1200/900 мкм, округлий нерівновісний Царамам 630/400 мкм. В результаті процесу MAO зразків різними магнітно-абразивними порошками було отримано поверхні, профілограми яких наведено на рис. 2. Зовнішній вигляд поверхні зразків наведено на рис. 3.



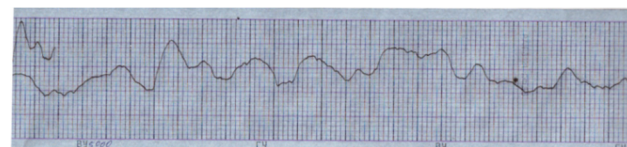
До MAO



MAO порошком S330 1200/900 мкм



MAO порошком Феромап 630/400 мкм



MAO порошком Царамам 630/400 мкм

Рис. 2. Профілограми поверхонь зразків після оброблення різними порошками. ГЗ 200, ВЗ 5000

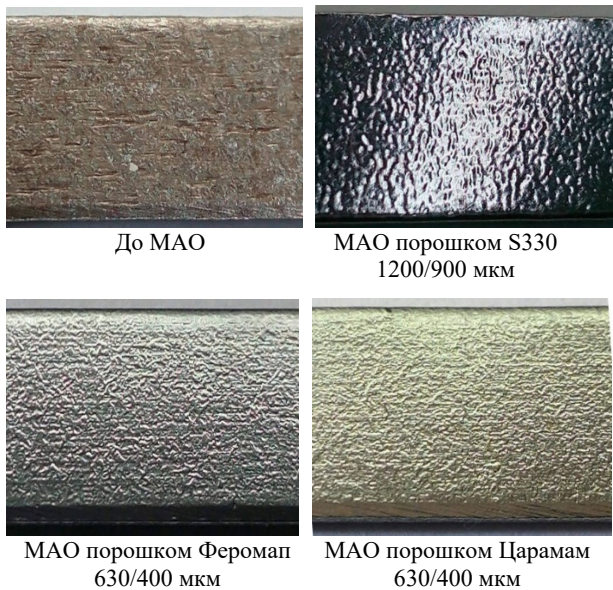


Рис. 3. Зовнішній вигляд поверхонь зразків після оброблення

Аналіз наведених профілограм поверхонь і їх зовнішній вигляд свідчать про те, що в процесі MAO відбувається 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 з практично сферичною формою зерен радіуси западин на профілограмах найбільші, в той час для поверхонь оброблених нерівновісним округлим порошком Царамам – вони найменші і відповідають величині радіусів округлення різальних кромek окремих зерен, наведених в [17]. Зміна мікрогеометрії поверхні зразків після MAO була несуттєвою, що пов'язано з вибраними режимами оброблення, які не є раціональними для забезпечення найбільшої поліруючої здатності і вибрані таким чином, щоб забезпечити максимальний вплив на зміну фізико-механічних характеристик поверхневого шару матеріалу зразків.

Було виконано вимірювання поверхневої твердості зразків до і після MAO. 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 1.

Показано, що найбільше збільшення ступеню наклепу має місце на глибині 5–5,5 мкм. Відзначимо, що зростання ступеню наклепу більше 35% відбувається після MAO зразків порошками з найменшими радіусами округлення різальних кромek – таких як Феромап – 30–60 мкм і Царамам – 10–50 мкм [17].

На зразках, що мають найбільшу середню ступінь наклепу, після MAO було визначено характер зміни твердості по глибині поверхневого шару. Для

цього було виготовлено косі шліфи під кутом  $9^\circ$  до обробленої поверхні. Вимірювання твердості виконували при навантаженні на індентор 0,2 Н. Результати вимірювань на зразках після MAO порошками Феромап 630/400 мкм, Царамам 630/400 мкм та S330 1200/900 мкм наведено на рис. 4.

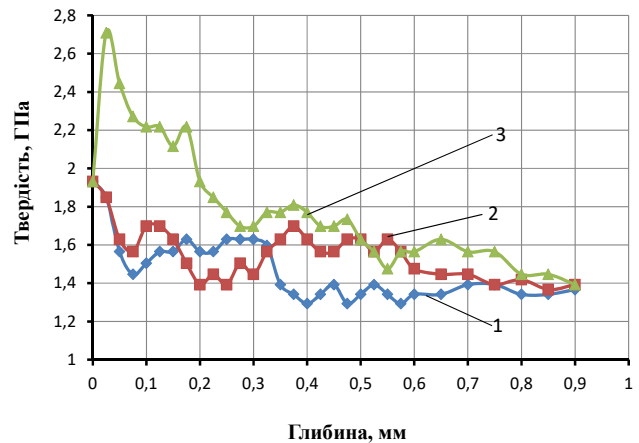


Рис. 4. Зміна твердості по глибині матеріалу зразків після MAO порошками Феромап 630/400 мкм – крива 1, Царамам 630/400 мкм – крива 2 і S330 1200/900 мкм – крива 3

Встановлено, що зміна твердості по глибині не є монотонною. Отримані результати є підтвердженням результатів досліджень наведених в [3]. Показано, що після MAO порошком Феромап маємо зростання твердості на глибині 120–320 мкм, в той час як після MAO порошком Царамам зростання твердості в поверхневому шарі відбувається на глибині 100–150 мкм і в шарі на глибині 350–570 мкм. Найбільш суттєве підвищення твердості в поверхневому шарі матеріалу зразків на глибині до 200 мкм має місце після MAO округлим порошком S330 з розміром частинок 1200/900 мкм, який виконує переважно пластичне деформування поверхневого шару. Отримані результати певним чином корелюють з даними отриманими при визначенні залишкових напружень – найбільше зростання 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.

При визначенні залишкових напружень, що виникають в зразках після MAO використовували методу, аналогічну запропонованій в роботі [18] на зразках свідках.

Після оброблення в разі вивільнення одного краю зразка під дією залишкових напружень, що сформувались у поверхневому шарі, відбувається його деформування (рис. 5).

Таблиця 1. Поверхнева твердість зразків після МАО

Порошок	Величина робочого зазору $h$ , мм	Навантаження на індентор, Н	$HV_{кін}$ , ГПа	Ступінь наклепу, %	Середня величина ступеню 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

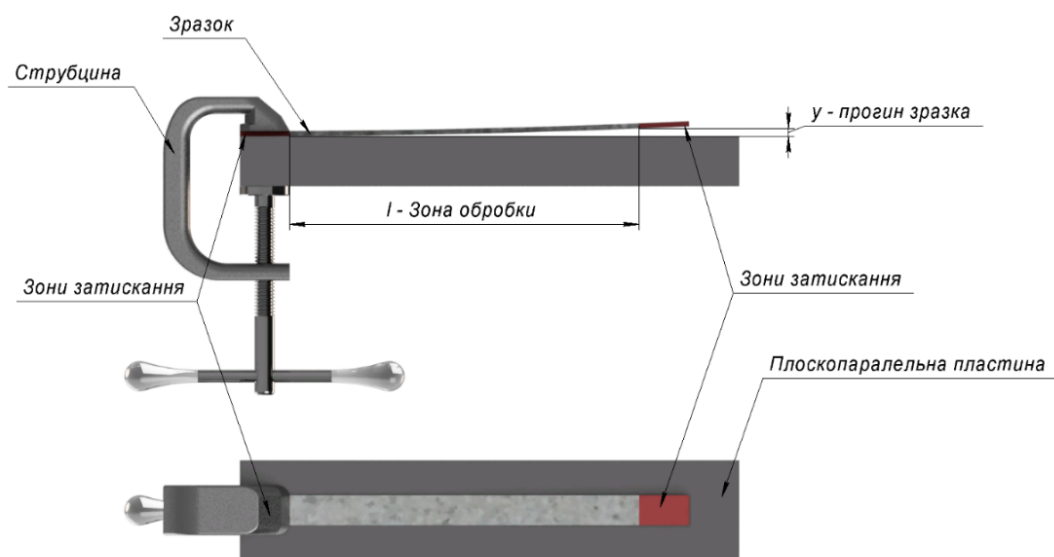


Рис. 5. Схематичне представлення вигину зразка після МАО

Таблиця 2. Результати визначення залишкових напружень в зразках 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

Для зручності в подальшому розрахунку внутрішніх напружень виконували із міркувань того, що ми маємо справу зі зразком у вигляді консольної балки довжиною  $l$  навантаженої рівномірно розподіленим навантаженням  $q$ , яке імітує дію магнітно-абразивного інструменту в процесі МАО (рис. 6).

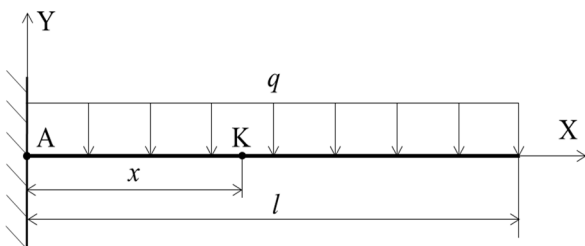


Рис. 6. Розрахункова схема

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:

$$M(x) = -\frac{ql^2}{2} + qlx + \frac{qx^2}{2}. \quad (1)$$

Для того щоб знайти функціональну залежність прогину балки потрібно розв'язати диференціальне рівняння (2), яке описує лінію вигину балки:

$$y''(x) = \frac{M(x)}{EI_x}. \quad (2)$$

Виконавши подвійне інтегрування обох частин рівняння (2) отримаємо:

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

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:

$$y(l) = \frac{ql^4}{8EI_x}. \quad (4)$$

Звідки

$$q = \frac{8y_{\max}EI_x}{l^4}. \quad (5)$$

Знаючи значення згинального моменту виразимо розподілене навантаження у вигляді (6).

$$q = \frac{2M}{l^2}. \quad (6)$$

З залежності нормальних напружень при згині балки  $\sigma = \frac{M}{W_x}$ , враховуючи (5) і (6) 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:

$$\sigma = \frac{2y_{\max}Eh}{l^2}. \quad (7)$$

За результатами наведеними в таблиці 2 можна оцінити залежність величини внутрішніх напружень як від величини робочого зазору, так і від типу використаного порошку.

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 за-

безпечують переважне пластичне деформування поверхневого шару, його мікронаклепування без значного диспергування матеріалу, яке притаманне MAO порошками з осколковою формою частинок типу Феромап.

## Висновки

Проведене дослідження впливу MAO плоских поверхонь головками типу “щітка” на базі постійних магнітів високої потужності на характеристики приповерхневого шару зразків зі сталі У9 показало, що при обробленні магнітно-абразивними порошками типу Феромап 630/400 мкм, Царамам 630/400 мкм та S330 1200/900 мкм відбувається наклепування поверхневого шару з середньою величиною ступеню наклепу до

40%, формування в поверхневому шарі від’ємних внутрішніх напружень величиною до 100 МПа відносно відпущеного стану після термічного оброблення, глибина зміцненого шару залежить від типу магнітно-абразивного порошку, що використовується для формування магнітно-абразивного інструменту. Показано, що загальна тенденція до зменшення впливу ударнофрикційної взаємодії із збільшенням робочого зазору зберігається для усіх використаних порошків. Після оброблення порошком S330 1200/900 мкм спостерігається найбільше наклепування і найбільша залишкова деформація дослідних зразків, а разом із тим в поверхневих шарах зразків формуються внутрішні напруження до 100 МПа, проти 30–80 МПа при використанні більш дрібних порошків Феромап та Царамам з розмірами частинок 630/400 мкм.

## References

- [1] Yu.M. Baron, *Magneto-abrasive and magnetic machining of products and cutting tools*, Leningrad: Mashinostroenie, 1986.
- [2] D.Yu. Dzhulii, “Increasing quality of multisided not sharpened hard-alloy plates by using magneto-abrasive machining in ring-type working area”, Cand. dissertation, Dept. Mech. Eng., National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine, 2014.
- [3] V.S. Maiboroda, I.V. Slobodyanyuk and D. Yu. Dzhulii, *Magneto-abrasive machining of parts with complex shape*. Zhitomir: PP “Ruta”, 2017.
- [4] 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.
- [5] M.M. Bobina *et al.*, “Structure and properties of the surface layer of a tool made of R6M5 steel after magneto-abrasive machining”, *Physics and chemistry of solid body*. pp. 577–580, 2002.
- [6] H. Yamaguchi, O. Fergani and P. Wu, “Modification using magnetic field-assisted finishing of the surface roughness and residual stress of additively manufactured components”, *CIRP Annals*, Vol. 66, No. 1, pp. 305–308, 2017. doi: 10.1016/j.cirp.2017.04.084
- [7] J. Guo *et al.*, “Novel rotating-vibrating magnetic abrasive polishing method for double-layered internal surface finishing”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 264, pp. 422–437, 2019. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2018.09.024
- [8] K. Zhou *et al.*, “Surface integrity of titanium part by ultrasonic magnetic abrasive finishing”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 80, No. 5–8, pp. 997–1005, 2015. doi: 10.1007/s00170-015-7028-z
- [9] V.S. Maiboroda, D.Yu. Dzhulii and A.I. Zelinko, “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 magneto-abrasive machining”, *Mechanics and Advanced Technologies*, Vol. 89, pp. 121–130, 2020. doi: 10.20535/2521-1943.2020.89.202696
- [10] A.S. Klymenko, *Finishing surface machining in the production of parts*. Minsk: Belaruskaja navuka, 2017.
- [11] V.S. Maiboroda *et al.*, “Magneto-abrasive machining of flat surfaces with permanent magnet heads”, *Technical Engineering*, Vol. 1(85), pp. 60–65, 2020. doi: 10.26642/ten-2020-1(85)-60-65
- [12] S.V. Kovalevsjkyj *et al.*, *New combined methods of machining the working surfaces of mechanical engineering parts (with the use of neural network analysis)*. Kramatorsk: DDMA, 2013.
- [13] F.Yu. Sakulevich, *Fundamentals of Magneto-abrasive machining*. Minsk: Nauka i tekhnika, 1981.
- [14] V.S. Maiboroda *et al.*, “AISI 1045 steel flat surfaces machining using the magneto-abrasive method”, *Journal of Engineering Sciences*, Vol. 7(1), pp. A1–A7, 2020. doi: 10.21272/jes.2020.7(1). a1
- [15] V. Maiboroda *et al.*, “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”, *Mechanics and Advanced Technologies*. Vol. 5, No. 1, pp. 97–102, 2021. doi: 10.20535/2521-1943.2021.5.1.229813
- [16] V. Maiboroda *et al.*, “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”, *Mechanics and Advanced Technologies*, No. 3(90), pp. 73–81, 2020. doi: 10.20535/2521-1943.2020.0.208535
- [17] I.V. Tkachuk, V.S. Maiboroda, “Geometric characteristics of magneto-abrasive powders”, *Reliability of the tool and optimization of technological systems*, Vol. 34, pp. 49–55, 2014.
- [18] 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.

## Influence of magneto-abrasive machining on the characteristics of the surface layer of flat parts

O. Burikov, D. Dzhulii, V. Maiboroda

**Abstract.** The paper presents the study of the influence of the process of magneto-abrasive machining (MAM) on the characteristics of the surface layers of flat surfaces of parts made of ferromagnetic material U9 by machining with end-type heads based on high-power permanent magnets that form a magneto-abrasive tool of the “brush” type. For estimation of the influence of the process of magneto-abrasive machining on the surface layer, the parameters of surface hardness were analyzed after the machining of test samples with different powders and under different modes. The degree of influence of the MAM on the surface, both in terms of the hardness of the surface layer and the deformation of samples due to compressive residual stresses arising as a result of machining, was studied. The estimation of the state of the surface layer was performed by the change in hardness after machining, the magnitude of the degree of hardening, to some extent, by the parameters of roughness. The control of changes in internal residual stresses formed in the surface layers of samples due to the interaction of powder particles with the surface during machining was carried out according to the degree of their deformation after MAM. It was found that due to MAM, internal compressive stresses of 30–100 MPa arise in the near-surface layer of the material of the samples, while the magnitude of the stresses varied in inverse dependency, that is, with an increase in the working gap, in the vast majority of cases, a decrease in the magnitude of the stresses was observed. It was shown that the depth of the hardened layer under different machining conditions is up to 200  $\mu\text{m}$  or more, and the strengthening coefficient varies from 10 to 40%.

**Keywords:** magneto-abrasive machining, end-type magnetic head, roughness, stress, hardness, surface layer.