

Віктор Станіславович Майборода¹, Олексій Олегович Буріков²

¹доктор технічних наук, професор кафедри конструювання машин
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: maiborodavs@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6902-6928>. SCOPUS Author ID: 7004207035

²аспірант кафедри конструювання машин
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: alekseyburikov@ukr.net

**МАГНІТНО-АБРАЗИВНЕ ОБРОБЛЕННЯ ПЛОСКИХ ПОВЕРХОНЬ
ФЕРОМАГНІТНИХ ДЕТАЛЕЙ ТОРЦЕВИМИ ГОЛОВКАМИ
НА БАЗІ ВИСОКОЕНЕРГЕТИЧНИХ МАГНІТІВ**

Досліджено вплив процесу магнітно-абразивного оброблення (МАО) феромагнітних плоских деталей торцевими головками на базі високоенергетичних магнітів на характеристики мікропрофілю поверхонь, залишкові напруження при використанні магнітно-абразивних порошків різної зернистості і форми. Встановлено залежність шорсткості оброблених поверхонь від якості обробки на етапах, що передували МАО. Доведено, що в процесі МАО відбувається мікропластичне деформування поверхневого шару виробів, яке призводить до його наклепування і формування залишкових стискаючих напружень. Керування величиною внутрішніх напружень можливо шляхом зміни величини робочого зазору, часу оброблення, розміру і форми частинок магнітно-абразивних порошків.

Ключові слова: магнітно-абразивне оброблення; торцеві головки; магнітно-абразивні порошки; залишкові напруження; мікрогеометрія поверхонь; шорсткість; високоенергетичні магніти.

Рис.: 4. Табл.: 1. Бібл.: 11.

Актуальність теми дослідження. Створення універсального інструменту, для фінішного оброблення виробів, який можна використовувати як на традиційних металорізальних верстатах, так і на верстатах з ЧПК при обробленні плоских поверхонь феромагнітних деталей є актуальною проблемою, вирішення якої може бути досягнуто методом магнітно-абразивного оброблення (МАО), який реалізується із застосуванням спеціальних торцевих головок на базі сталей високоенергетичних магнітів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Попередні дослідження процесу МАО з використанням різноманітних конструкцій торцевих головок, виготовлених на базі потужних сталей неодимових магнітів [1–4] дозволили встановити раціональні форми робочих поверхонь і особливостей розташування магнітів в корпусах торцевих головок. Отримані результати впливу технологічних умов процесу МАО, типу і складу магнітно-абразивних порошків дозволили встановити раціональні швидкості оброблення, величини робочих зазорів, часу оброблення необхідного для отримання низької шорсткості оброблюваних поверхонь. Проте об'єм наведених результатів обмежений і не враховує спадковості попереднього оброблення, не дозволяє однозначно визначити форму і розмір частинок магнітно-абразивних порошків, особливо враховуючи той факт, що експериментальні результати, отримані при МАО площин торцевими головками порошками з розміром частинок 630/400 мкм забезпечують формування мінімальної шорсткості поверхонь з $Ra < 0,1$ мкм, що суперечить загально відомій інформації – чим дрібніші зерна магнітно-абразивного порошку при МАО, тим меншу величину параметру Ra можливо отримати [5–7]. Зазначене протиріччя може бути пов'язано з відсутністю інформації про кінетику формування мікропрофіля шорсткої поверхні при МАО торцевими головками, що ускладнює визначення технологічних умов оброблення, спрямованих на досягнення низької шорсткості поверхонь з певним її мікропрофілем і властивостями.

Метою роботи є визначення впливу на шорсткість, мікрогеометрію і окремі фізико-механічні властивості оброблених методом МАО поверхонь, факторів пов'язаних з спадковістю оброблення, тобто величиною шорсткості і стану мікрогеометрії поверхонь до МАО, розміру, форми частинок використовуваних порошків. Доцільним є проведення досліджень з використанням магнітно-абразивних порошків різної геометричної форми з розміром частинок більше 1 мм.

Експериментальні дослідження виконували на плоских поверхнях зразків зі сталі 40Х в два етапи. Для MAO використовували торцеву головку типу "щітка" [1], частота її обертання навколо власної осі 900 об/хв і величина поперечної подачі 20 мм/хв. На першому етапі при використанні магнітно-абразивних порошків осколкової форми Феромап з розміром частинок 200/100 мкм, 315/200 мкм, 400/315 мкм і 630/400 мкм величина зазору між поверхнею головки та оброблюваною варіювалась в діапазоні 1 – 4 мм. Шорсткість поверхонь зразків після шліфування абразивним кругом з електрокорунду нормального 15А складала 0,19 – 0,21 мкм; після шліфування алмазним кругом – $Ra=0,49 – 0,52$ мкм. На другому етапі шорсткість поверхонь до MAO складала $Ra=0,53 – 0,68$ мкм. Оброблення виконували магнітно-абразивними порошками сферичної форми S330 та дробом чавунним (ДЧ) з середнім розміром частинок 1,62 мм і 1,5 мм відповідно. На кожному етапі досліджень контролювали величину параметру шорсткості Ra після MAO та характер зміни величини відносної опорної довжини профілю – tp в залежності від рівня перетину – p . Отримані на першому етапі результати зміни параметра Ra наведено на рис. 1.

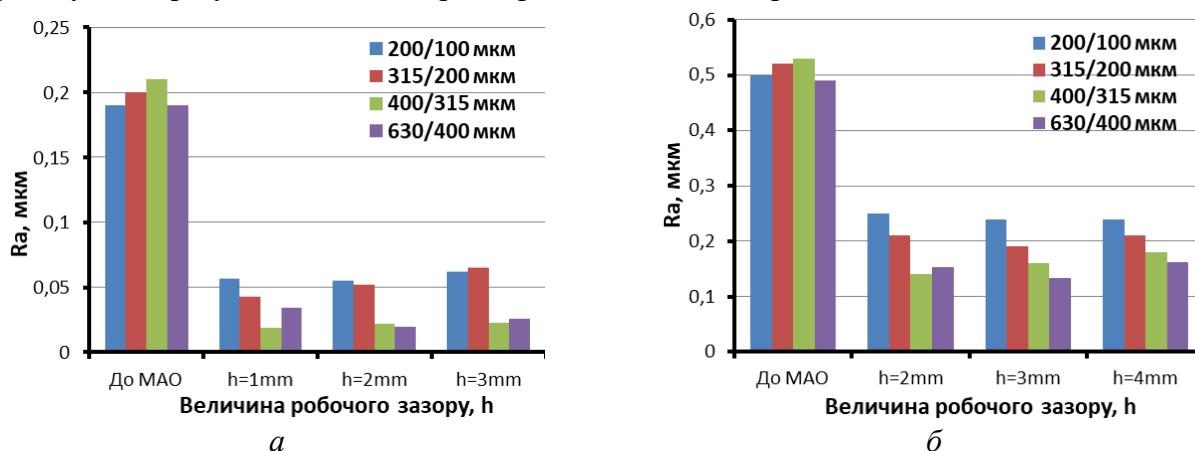


Рис. 1. Зміна шорсткості поверхні після MAO різними за розміром порошками і при різних робочих зазорах і середній вихідній шорсткості $Ra = 0,2$ мкм (а) і $Ra=0,51$ мкм (б)
Джерело: розроблено авторами.

Найкращі результати отримані при MAO крупними порошками з величиною робочого зазору $h=2-3$ мм. Відзначимо, що чим менша величина Ra була отримана до MAO, тим краща шорсткість формується після MAO. Це пов'язано з величиною мікрохвилястості поверхні, сформованої на етапі шліфування. Підтвердженням цього є залежності зміни величини відносної опорної довжини профілю – tp від рівня перетину – p (рис. 2).

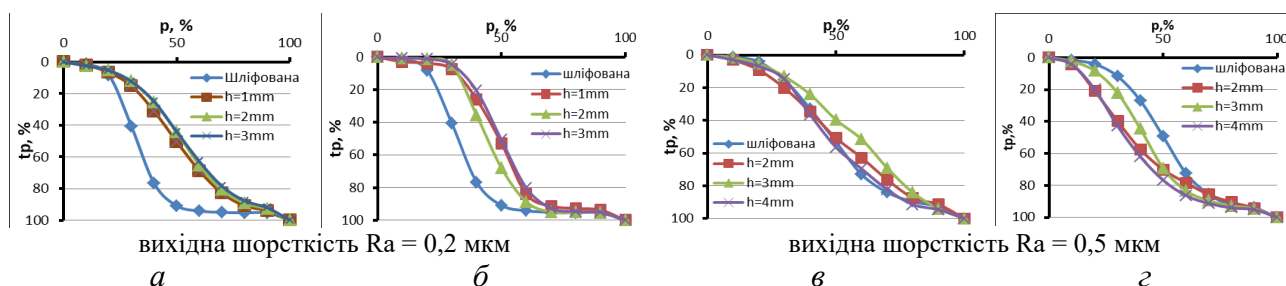


Рис. 2. Залежності зміни величини відносної опорної довжини профілю – tp від рівня перетину – p після MAO порошком Феромап з розміром частинок 200/100 мкм (а), 630/400 мкм (б), 400/315 мкм (в), 630/400 мкм (г)
Джерело: розроблено авторами.

Порівняння залежностей зміни величини відносної опорної довжини профілю – tp до і після MAO свідчить про те, що в процесі оброблення має місце активне пластичне деформування поверхневого шару яке сприяє процесу вигладжуванню мікропрофіля [9].

Для підтвердження наявності активного пластичного деформування поверхні після МАО на тестових зразках з сталі У9 було виконано контроль середнього рівня залишкових напружень в поверхневому шарі [11]. На цьому етапі досліджень використовували осколковий рівновісний магнітно-абразивний порошок Феромап з розміром частинок 1000/630 мкм. Величину робочого зазору варіювали в діапазоні 3-7 мм, а час оброблення від 3 до 12 хвилин. Як і на попередніх етапах досліджень була використана торцева головка типу «щітка» [1] при частоті її обертання навколо власної осі 900 об/хв і величині поперечної подачі 20 мм/хв. Розраховані значення залишкових напружень після МАО наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Залишкові напруження в тестових зразках з сталі У9 після МАО

| Час МАО, хв | Робочий зазор, мм | | | | |
|-------------|-------------------|------|------|------|------|
| | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| | Напруження, МПа | | | | |
| 3 | 39,53 | 57,5 | 60,9 | 71 | 55 |
| 6 | 52,4 | 58,6 | 67 | 74,2 | 55,2 |
| 9 | 57,9 | 57,5 | 65 | 73 | 57 |
| 12 | 59,2 | 58 | 63 | 72,2 | 56,3 |
| 15 | 62,5 | 58,6 | 60 | 71,8 | 56,3 |

Джерело: розроблено авторами.

Встановлено, що вихід на стабільні параметри напружень відбувається за 3-6 хвилин. При цьому активна взаємодія часток магнітно-абразивного порошку та оброблюваної поверхні майже припиняється внаслідок виходу на рівномірну шорсткість та затухання процесу активної пластичної деформації. Підвищений рівень залишкових напружень при значенні зазору 6 мм може бути пов'язаний з раціональною величиною робочого зазору при МАО порошком Феромап із розмірами фракції 1000 мкм /630 мкм, при якому формується стабільний магнітно-абразивний інструмент [10].

Враховуючи результати вище наведених досліджень і результатів робіт [8–10] на другому етапі використовували магнітно-абразивні порошки з крупним розміром частинок округлої форми. МАО в умовах ідентичних першому етапу було отримано зниження шорсткості в 2,5–4 рази. Причому використання більш крупних частинок дозволило отримати кращі результати (рис. 3).

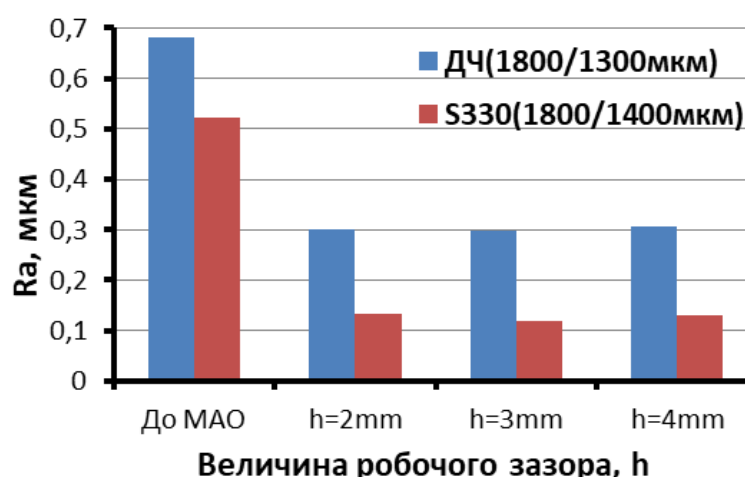


Рис. 3. Зміна шорсткості поверхні після МАО різними порошками і при різних величинах робочих зазорів – h, мм

Джерело: розроблено авторами.

Характер зміни величини відносної опорної довжини профілю – tr від рівня перетину – p після MAO порошками сферичної форми при різних величинах робочих зазорів наведено на рис. 4.

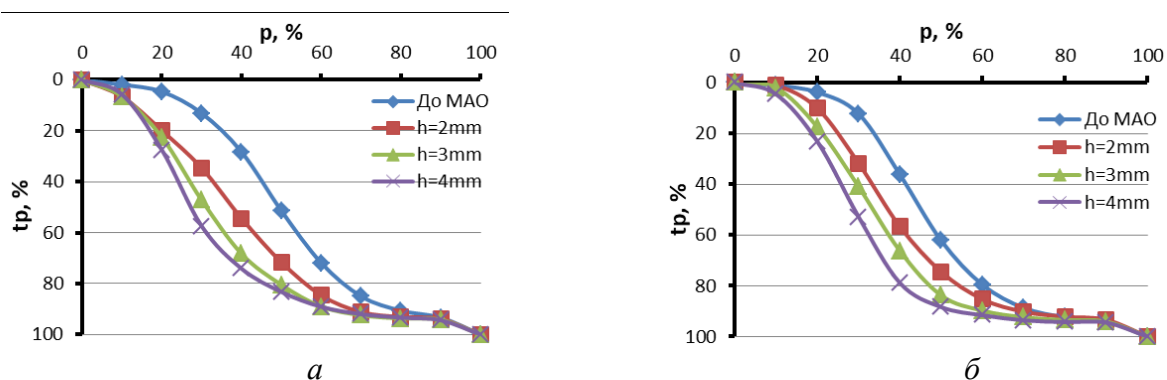


Рис. 4. Залежності зміни величини відносної опорної довжини профілю – tr від рівня перетину – p після MAO порошком S330 з розміром частинок 1800/1400 мкм (а), ДЧ розміром частинок 1800/1300 мкм (б)

Джерело: розроблено авторами.

Встановлено, що за умов MAO, ідентичних обробленню зразків із сталі 40X, на тестових зразках при використанні порошку S330 ступінь наклепу на глибині 3 мкм дорівнює 0,53, а на глибині 5 мкм – 0,3, а при використанні порошку ДЧ – 0,44 і 0,31, відповідно. Рівень залишкових стискаючих напружень після MAO порошком S330 досягає 118 МПа, а порошком ДЧ – 165 МПа.

Висновки. Виконано комплексні дослідження впливу процесу MAO феромагнітних плоских поверхонь торцевими головками на базі високоенергетичних магнітів на характеристики мікропрофілю поверхонь, залишкових напружень при використанні магнітно-абразивних порошків різної зернистості і форми. Показано, що в залежності від вихідної шорсткості поверхонь метод MAO забезпечує можливість отримання параметру шорсткості R_a на рівні 0,03 – 0,12 мкм. Показано, що чим менша величина параметру R_a була отримана до MAO, тим нижча шорсткість формується після, що пов'язано з спадковістю оброблення, величиною мікрохвилястості поверхні, сформованої на етапах фрезерування та шліфування. Доведено, що в процесі MAO відбувається мікропластичне деформування поверхневого шару виробі, яке призводить до його наклепування та формуванню в ньому залишкових стискаючих напружень, величина яких залежить як від розмірів частинок магнітно-абразивних порошків, так і від їх форми. Найбільші напруження на рівні 75-165 МПа отримано при використанні переважно порошків округлої форми з розміром частинок в діапазоні 0,8 - 1,62 мм. Керування величиною внутрішніх напружень можливо шляхом зміни величини робочих зазорів, тривалості часу оброблення, розміру і форми частинок магнітно-абразивних порошків.

Список використаних джерел

1. Maiboroda, V. S. AISI 1045 Steel Flat Surfaces Machining Using the Magneto-Abrasive Method [Electronic resource] / V. S. Maiboroda, O. O. Belajev, D. Yu. Dzhulii, I. V. Slobodianiuk // Journal of Engineering Sciences. – 2020. – Vol. 7, no. 1. – P. A1–A7. – Mode of access: [https://doi.org/10.21272/jes.2020.7\(1\).a1](https://doi.org/10.21272/jes.2020.7(1).a1).
2. Zelinko A. Magnetabrasives Polieren auf Bearbeitungszentren: Phd-Thesis, Technischen Universität Dortmund, Germany, 2022. – 153 p.
3. Maiboroda V. S. Flat surfaces machining by the magneto-abrasive method with permanent magnet end-type heads. 2. The influence of the design of the working surfaces of the heads on the effectiveness of the magneto-abrasive machining / V. S. Maiboroda, D. Yu. Dzhulii, A. I. Zelinko, A. Burikov // Mechanics and Advanced Technologies. – 2020. – Vol. 90, № 3. – Pp. 73-81.

4. Майборода, В. С. Обработка плоских поверхностей магнитно-абразивным методом торцевыми головками на постоянных магнитах 3. Влияние типа рабочих головок на эффективность магнитно-абразивной обработки / В. С. Майборода, Д. Джулий, А. Зелинко, О. Буриков // *Mechanics and Advanced Technologies*. – 2021. – Т. 5, Вып. 1. – С. 97-102.
5. Барон, Ю. М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов / Ю. М. Барон. – Л.: Машиностроение, 1986. – 176 с.
6. Олиker, В. Е. Порошки для магнитно-абразивной обработки и износостойких покрытий / В. Е. Олиker. – Москва: Металлургия, 1990. – 176 с.
7. Сакулевич, Ф. Ю. Основы магнитно-абразивной обработки / Ф. Ю. Сакулевич. – Минск : Наука и техника, 1981. – 327 с.
8. Майборода, В. С. Магнитно-абразивная обработка плоских поверхностей головками на постоянных магнитах / В. С. Майборода, И. В. Слободянюк, Д. Ю. Джулий, А. И. Зелинко // *Технічна інженерія*. – 2020. – № 1(85). – С. 60-65.
9. Шкурупий, В. Г. Аналитическое описание и технологическое обеспечение параметров шероховатости обработки / В. Г. Шкурупий, Ф. В. Новиков // *Резание и инструмент в технологических системах*. – 2004. – Вып. 67. – С. 46-56.
10. Майборода, В. С. Обработка плоских поверхностей магнитно-абразивным методом торцевыми головками на постоянных магнитах. 1. Влияние типа магнитно-абразивного порошка на эффективность магнитно-абразивной обработки / В. С. Майборода, Д. Ю. Джулий, А. И. Зелинко // *Mechanics and Advanced Technologies*. – 2020. – Том 89, № 2. – С. 121-130.
11. Буриков, О. О. Влияние магнитно-абразивной обработки на характеристики поверхностного шару плоских деталей. / О. Буриков, В. Майборода, Д. Джулий // *Mechanics and Advanced Technologies*. – 2022. – Том 6, № 3. – С. 286-292.

References

1. Maiboroda, V.S., Belajev, O.O., Dzhulii, D.Yu., Slobodianiuk, I.V. (2020). AISI 1045 Steel Flat Surfaces Machining Using the Magneto-Abrasive Method. *Journal of Engineering Sciences*, 7(1), A1–A7. doi: 10.21272/jes.2020.7(1).a1.
2. Zelinko, A. (2022). Magnetabrasives Polieren auf Bearbeitungszentren. *Phd Thesis*. Technischen Universität Dortmund, Germany.
3. Maiboroda, V.S., Dzhulii, D.Yu., Zelinko, A.I., Burikov, A. (2020). Flat surfaces machining by the magneto-abrasive method with permanent magnet end-type heads. 2.The influence of the design of the working surfaces of the heads on the effectiveness of the magneto-abrasive machining. *Mechanics and Advanced Technologies*, 90(3), 73-81.
4. Maiboroda, V., Dzhuliy, D., Zelinko, A., Burikov, O. (2021). Obroblennya ploskykh poverkhon mahnitno-abrazyvnyim metodom tortsevymy holovkamy na postiynykh mahnitakh 3. Vplyv typu robochykh holovok na efektyvnist mahnitno-abrazyvnoho obroblennya [Machining of flat surfaces by magnetic abrasive method with permanent magnet end heads 3. Influence of the type of working heads on the efficiency of magnetic abrasive machining]. *Mechanics and Advanced Technologies*, 5(1), 97–102.
5. Baron, Yu.M. (1986). *Magnitno-abrazivnaya i magnitnaya obrabotka izdeliy i rezhushchikh instrumentov* [Magnetic-abrasive and magnetic processing of products and cutting tools]. Mashinostroyeniye.
6. Olikier, V.Ye. (1990). *Poroshki dlya magnitno-abrazivnoy obrabotki i iznosostoykikh pokrytiy* [Powders for magnetic-abrasive processing and wear-resistant coatings]. Moscow: Metallurgiya.
7. Sakulevich, F.Yu. (1981). *Osnovy magnitno-abrazivnoy obrabotki* [Fundamentals of magnetic abrasive processing]. Minsk: Nauka i tekhnika.
8. Maiboroda, V.S., Slobodyanyuk, I.V., Dzhuliy, D.Yu., Zelinko, A.I. (2020). Magnitno-abrazivnaya obrabotka ploskikh poverkhnostey golovkami na postoyannykh magnitakh [Magnetic abrasive machining of flat surfaces by permanent magnet heads]. *Tekhnichna inzheneriya – Technical Engineering*, 1(85), 60-65.
9. Shkurupiy, V.G., Novikov, F.V. (2004). Analiticheskoye opisaniye i tekhnologicheskoye obespecheniye parametrov sherokhovatosti obrabotki [Analytical description and technological support of machining roughness parameters]. *Rezaniye i instrument v tekhnologicheskikh sistemakh – Cutting and tooling in technological systems*, 67, 46–56.

10. Maiboroda, V.S., Dzhuliy, D.Yu., Zelinko, A.I. (2020). Obrabotka ploskikh poverkhnostey magnitno-abrazivnym metodom tortsevymi golovkami na postoyannykh magnitakh. 1. Vliyaniye tipa magnitno-abrazivnogo poroshka na effektivnost magnitno-abrazivnoy obrabotki [Processing of Flat Surfaces by Magnetic Abrasive Method with Permanent Magnet End Heads. 1. Influence of the Magnetic Abrasive Powder Type on the Effectiveness of Magnetic Abrasive Processing]. *Mechanics and Advanced Technologies*, 89(2), 121-130.

11. Burikov, O., Maiboroda, V., Dzhuliy, D. (2022). Vplyv mahnitno-abrazyvnoho obroblennya na kharakterystyky poverkhnovoho sharu ploskykh detaley [Influence of magnetic abrasive treatment on the characteristics of the surface layer of flat parts]. *Mechanics and Advanced Technologies*, 6(3), 286-292.

Отримано 28.11.2024

UDC 621.923

Victor Maiboroda¹, Oleksij Burikov²

¹Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of machine design

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: maiborodavs@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6902-6928>. SCOPUS Author ID: 7004207035

²PhD Student of the Department of machine design

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: alekseyburikov@ukr.net

MAGNETIC-ABRASIVE TREATMENT OF FLAT SURFACES OF FERROMAGNETIC PARTS WITH END HEADS BASED ON HIGH-ENERGY MAGNETS

A comprehensive study of the influence of the process of magnetic-abrasive machining (MAM) of ferromagnetic flat parts with end heads based on high energy magnets on the characteristics of the surface microprofile and residual stresses has been carried out. The study was carried out using magnetic abrasive powders of different grain sizes and shapes. The results of the research showed that, depending on the initial surface roughness, this process makes it possible to obtain the roughness parameter Ra in the range of 0.03 - 0.12 microns. The lower the value of the roughness parameter Ra obtained before the process of magnetic-abrasive machining, the lower the roughness formed after magnetic-abrasive machining. Such results are explained by the heredity of the machining, in particular by the size of the surface micro-roughness formed during the stages of pre-processing by milling and grinding. It has been shown that during the process of magnetic-abrasive machining, microplastic deformation of the surface layer of the products occurs, which leads to their riveting and the formation of residual compressive stresses in them. The magnitude of the residual compressive stresses depends on the size of the particles of the magnetic-abrasive powders and their shape. During the research, the highest stress values in the range of 75-165 MPa were obtained when using mainly rounded powders with a particle size in the range of 0.8-1.62 mm. In the case of magnetic-abrasive machining, it is possible to control the magnitude of internal stresses in the surface layer of parts by changing the size of the working gap, the duration of the machining time, the size and shape of the particles of magnetic-abrasive powders.

Keywords: magnetic abrasive machining; end heads; magnetic abrasive powders; residual stresses; surface microgeometry; roughness; high-energy magnets.

Fig.: 4. Table: 1. References: 11.