

Юрій Олександрович Григор'єв¹, Віктор Станіславович Майборода²

¹аспірант кафедри конструювання машин
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна),
E-mail: 0240596@gmail.com

²доктор 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

АНАЛІЗ ПЕРСПЕКТИВ ЗАСТОСУВАННЯ ВИСОКОЕНЕРГЕТИЧНИХ СТАЛИХ МАГНІТІВ ДЛЯ ФІНІШНОГО ОБРОБЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ СКЛАДНИХ ФОРМ МАГНІТНО-АБРАЗИВНИМ МЕТОДОМ

Визначено особливі вимоги до стану оброблюваних поверхонь – шорсткості, фізико-механічних властивостей поверхневих шарів. Показано, що перспективним напрямком при забезпеченні відповідної якості виробів певного призначення є впровадження методу магнітно-абразивного оброблення (МАО) який доцільно використовувати для оброблення як внутрішніх, так і плоских поверхонь деталей особливо на верстатах з ЧПК з використанням спеціального інструменту у вигляді головок на базі високоенергетичних сталей магнітів. Проаналізовані схеми оброблення, конструкції торцевих і периферійних змінних головок які використовують для МАО. Стисло наведені результати досліджень процесу МАО головками різних типів, технологічних умов процесу та їх вплив на отриману мікрогеометрію, фізико-механічні властивості поверхневих шарів після МАО. Показана доцільність застосування спеціальних головок з використанням сталей високоенергетичних магнітів для створення мобільного магнітно-абразивного інструменту здатного забезпечувати високоєфективне, продуктивне полірування поверхонь відповідальних виробів з шорсткістю $Ra < 0,05$ мкм і керованим рівнем поверхневої твердості та залишкових напружень в поверхневих шарах.

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

Рис.: 5. Бібл.: 34.

Актуальність теми дослідження. Вимоги до якості поверхні компонентів, а отже, і до використовуваних процесів обробки, зростають, особливо в інструментальному виробництві, при виготовленні пресформ, у медичних технологіях, аерокосмічній, оптичній та астрономічній галузях. Зі зростанням складності форм, від плоских та обертально-симетричних поверхонь до асиметричних поверхонь вільної форми витрати на їх виробництво суттєво зростають. Численні виробничі процеси обробки плоских та довірливих поверхонь зараз використовуються в промисловості, і вони були широко вивчені. До них належать надточні процеси (шліфування, токарне оброблення, фрезерування), абразивні процеси (притирання, вібраційна обробка, ручне полірування, магнітореологічне полірування), процеси піскоструминної обробки, полірування лазерними або електронними променями, електрохімічне полірування та багато інших. Однак усі технології обробки мають обмеження щодо досягнутої якості поверхні (макрогеометрія, топографія та властивості поверхневих шарів), а також недоліки, характерні для кожного процесу. Зокрема, низька продуктивність більшості процесів обробки є найбільшим обмеженням у їх застосуванні. Тим не менш, такі технології, які іноді включають застосування ручної обробки продовжують використовуватися в промисловості через відсутність альтернатив. Магнітно-абразивне полірування (МАП) – це спеціальний процес обробки з геометрично невизначеною різальною кромкою або дуже слабо зв'язаним зерном, яке може стати конкурентоспроможним багатьом технологіям обробки. МАП наразі використовується як спеціальна технологія, наприклад, для обробки різальних інструментів, лопаток газотурбінних двигунів і є предметом наукових досліджень та широкого промислового впровадження.

У літературі описано різноманітні кінематичні схеми процесу магнітно-абразивного полірування. У більшості випадків процес виконується на окремому верстаті, що часто є не вигідним з погляду гнучкості та універсальності. Перспективним застосуванням у про-

мисловості є впровадження цієї технології на типових оброблювальних центрах. Це передбачає використання інструменту для МАП, який можна інтегрувати у верстат як стандартний. Основна ідея такої інтеграції полягає у виконанні автоматизованого полірування після обробки на оброблювальному центрі, що дозволяє уникнути витрат на використання спеціалізованої технології обробки або необхідності трудомісткої ручної роботи. Цей потенціал виникає завдяки постійному розвитку гнучких оброблювальних центрів, особливо щодо їхньої точності позиціонування, а також економічно ефективного масового виробництва дуже потужних постійних магнітів на основі неодиму, заліза та бору ($\text{Fe}_{14}\text{Nd}_2\text{B}$) у компактному вигляді. Майбутня розробка нових матеріалів із високою постійною намагніченістю може, серед іншого, запропонувати подальший потенціал розвитку магнітно-абразивного полірування, як фінішного методу обробки для забезпечення високої якості. Наразі існує обмежена кількість обґрунтованих наукових досліджень на зазначену тему. Фундаментального, комплексного та прикладного дослідження сьогодні бракує.

Якість поверхні заготовки описується її макрогеометрією, топографією та станом поверхневого шару. Макрогеометрія включає точність розмірів (площинність, паралельність тощо) та хвилястість. Топографія описується двовимірними параметрами шорсткості (наприклад, R_a , R_q , R_z) та тривимірними параметрами шорсткості (наприклад, S_a , S_q та S_z), а також мікроструктурою. Стан поверхневого шару визначається щільністю дислокацій, вакансій, спотвореннями кристалічної границі в ньому, мікроструктурними змінами, поверхневою твердістю та приповерхневими залишковими напруженнями. Саме зазначені характеристики поверхні і поверхневого шару суттєво впливають на функціональні властивості виробів, такі як термін їх служби, умови тертя, зношування, тепловідлення, вібрації, шумоутворення, умови змащування, корозійну стійкість та оптичні властивості. Так хвилястість поверхонь і їх топографія суттєво впливають на показники шуму, що генерується, наприклад, при роботі зубчастих пар. Безпосередньо топографія поверхонь має значний вплив на умови змащування, корозійну стійкість та оптичні властивості. Цілісність поверхні відіграє важливу роль на термін служби робочих поверхонь, наприклад, з погляду схильності до розтріскування [1], зародження втомних тріщин [2; 3]. Залежно від того в яких умовах використовують вироби вони повинні мати певні функціональні властивості та відповідні характеристики поверхонь заготовок.

Проаналізуємо деякі галузі, які потребують використання виробів зі специфічними властивостями робочих поверхонь, а саме з низькою шорсткістю, певним рівнем залишкових напружень в поверхневих шарах та ін.

1. Виготовлення інструментів і пресформ.

Зазначена галузь відіграє вирішальну роль у сучасних виробничих ланцюгах, особливо у багатосерійному виробництві, оскільки більшість компонентів у масовому виробництві виготовляються методом лиття під тиском або компресійного лиття [4]. Наприклад, світові продажі пресформ у 2019 році склали приблизно 16,4 мільярда доларів США, з прогнозованим зростанням до 19,5 мільярда доларів США у 2025 році [5]. Через свою геометричну складність та вимоги до високої якості робочих поверхонь, їх виробництво суттєво ускладнено. Як правило, вони вимагають тривалого часу розробки та тривалих процедур введення в експлуатацію, а також значних витрат у кілька сотень тисяч євро [6]. Пресформи часто виготовляються за допомогою високошвидкісного фрезерування. Також використовуються інші виробничі процеси, але їхня продуктивність обмежена [7]. У виробництві інструментів та пресформ переважно використовуються спеціальні леговані сталі, сірий чавун, твердий сплав. У сталевих виробів поверхня після чорнової обробки гартується, а потім додатково обробляється та полірується, для забезпечення тривалого

терміну служби. Якість поверхні (шорсткість, топографія, залишкові напруження та мікротвердість) суттєво впливає не тільки на термін служби пресформ, але й, перш за все, на процес виробництва з погляду кінцевої якості [4]. Остаточна обробка поверхні прес-форм, наприклад, для отримання достатньо високої прозорості пластикових пляшок, може бути досягнута лише за допомогою складних процесів полірування. Полірування забезпечує утворення високо глянцевої поверхні з шорсткістю на рівні $Ra = 0,01-0,03$ мкм [8; 9]. Така якість поверхні важлива для поверхні форм при литті під тиском оптичних лінз невеликих камер мобільних телефонів [4]. Сьогодні не розроблено автоматизованого процесу полірування для виготовлення пресформ, тому ручне полірування часто залишається єдиним способом забезпечити високу якість поверхні на складних і великих поверхнях вільної форми. Ручне полірування вимагає кваліфікованих працівників з багаторічним досвідом, що становить до 50% виробничого часу, необхідного для обробки [9, 10]. З цих причин існує велика потреба у скороченні часу виготовлення прес-форм, особливо на етапі фінішної обробки, та при розробці технології автоматизованого, економічно і ефективного полірування.

2. Технології, що використовують при виготовленні силових установок

Типові продукти в галузі силових установок включають газові турбіни для літаків, парові турбіни для вироблення електроенергії та турбокомпресори для автомобілів. Ринок зростає: Rolls-Royce планує виробляти приблизно 68 000 авіаційних двигунів у період з 2012 по 2031 рік [11]. Наразі прогнозується збільшення загального доходу ринку з 1,2 млрд. доларів США у 2021 році до 1,5 млрд. доларів США у 2026 році [12]. Використовувані матеріали характеризуються високою термостійкістю, питомою міцністю та зносостійкістю. До них належать такі важкооброблювані матеріали: високолеговані корозійностійкі сталі, алюмініди титану, суперсплави на основі титану та нікелю відповідно до сучасного рівня техніки або полімерні, металеві та керамічні композити, які зараз розробляються [13]. В аерокосмічній техніці нікелеві сплави мають найбільшу частку застосування (40-50%), за ними йдуть титанові сплави приблизно з 30%. Композитні матеріали мають значний потенціал і можуть сприяти зниженню ваги до 40%.

Виробництво виробів в аерокосмічній техніці з високотемпературних матеріалів характеризується високими витратами часу та коштів. Для попередньої обробки використовується звичайне 5-осьове фрезерування, електроерозійна обробка. Для чистової обробки використовуються різні технології, такі як вібраційна обробка, піскоструминна обробка або аеродинамічне притирання [14]. У промисловості часто використовується широкий спектр шліфувальних операцій як для чорнової, так і для чистової обробки [15]. При цьому вимоги до обробки поверхні деталей характеризуються допусками на розміри менш як 10 мкм та $Ra < 0,5$ мкм [16], залишковими напруженнями стиску в поверхневих шарах та відсутністю пошкоджень, що сприяє підвищенню їхньої працездатності. Так званий «білий шар», який часто утворюється внаслідок термічного впливу в процесі шліфування, знижує втомну міцність до 90% і тому є критично важливою характеристикою якості [17]. До 2050 року авіаційна промисловість прагне скоротити викиди CO_2 на 75 %, викиди NO_x на 90 % та шумове забруднення на 65 %. З цих причин існує велика потреба в нових, економічно ефективних технологіях фінішної обробки [18].

3. Медичні технології

Через високі вимоги до якості медичних компонентів, процеси фінішного оброблення мають велике значення, наприклад, у виробництві імплантатів кульшового та колінного суглобів або медичних інструментів [19]. Очікується, що продажі медичних імплантатів у Європі зростуть з 3,5 мільярда доларів США у 2015 році до приблизно 3,7 мільярда доларів США у наступні 5-7 років.

Медичні імплантати та інструменти виготовляються переважно з біоактивних та корозійностійких металів і кераміки. Метали використовуються для імплантатів кульшового та колінного суглобів, а також для фіксації кісток у вигляді штифтів, пластин та гвинтів. Найпоширенішими металевими матеріалами є чистий титан та титанові сплави, кобальт-хромові та нікель-титанові сплави, а також нержавіючі сталі (переважно 1.4404). У галузі керамічних матеріалів часто використовуються оксиди металів, такі як Al_2O_3 , MgO , ZiO , склокераміка, кальцій і матеріали на його основі [20]. Завдяки низьким коефіцієнтам тертя, високій зносостійкості, добрій біосумісності та змочуваності, оксиди алюмінію та цирконію використовуються в імплантатах кульшового та колінного суглобів [21].

Для виготовлення імплантатів складних форм використовуються методи адитивного виробництва. Потім напівфабрикати фрезеруються або шліфуються за допомогою 5-осьової обробки. Технології фінішної обробки включають електрохімічне полірування, вібраційне фінішне оброблення, ручне полірування або магнітореологічне полірування. Керамічні імплантати в основному виготовляються шляхом шліфування [15]. Низька шорсткість поверхонь імплантатів позитивно впливає на адгезію, надмірне розростання тканин, життєздатність клітин, зносостійкість та трибологічну поведінку [20]. Для кобальт-хромових сплавів потрібна якість поверхні $Ra < 0,02$ мкм. Залишкові напруження стиску збільшують термін служби імплантатів, що піддаються циклічному навантаженню, і таким чином зменшують ймовірність руйнування, а отже, і повторних операцій [21]. Особливою сферою застосування є обробка складних кобальт-хромових колінних та кульшових імплантатів [19]

Спостерігається підвищений попит на передові технології очищення (сверхчисті технології) при виробництві чистих труб для транспортування високочистих газів і рідин. Забруднення на внутрішніх поверхнях труб може викликати корозію, тріщини та загрозу безпеці. У медичній промисловості це може призвести до погіршення якості ліків та бактеріальних інфекцій [22-24]. Для запобігання цьому необхідна нано- та мікропрецизійна обробка внутрішніх поверхонь труб з Ra не більше 100 нм. Прецизійна обробка потрібна для труб різної форми: тонко- і товстостінних, прямих і вигнутих.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. На теперішній час обробка внутрішніх поверхонь чистих труб в основному здійснюється електролітичним методом. Застосування ручної обробки вигнутих частин перед електролітичним процесом знижує точність і ускладнює роботу з шкідливими металами, розчиненими в електроліті. Тому розробка нових методів прецизійної обробки, таких як магнітно-абразивна обробка (МАО), є актуальною.

Метою роботи є доведення доцільності застосування спеціального інструменту у вигляді торцевих і периферійних головок виготовлених з використанням сталей високоенергетичних магнітів для фінішного оброблення поверхонь різної форми.

Виклад основного матеріалу.

Застосування методу МАО з використанням спеціальних головок на базі високоенергетичних сталей магнітів.

Перспективним напрямком в впровадженні методу МАО для оброблення як внутрішніх, так і плоских поверхонь деталей особливо на верстатах з ЧПК є використання спеціального інструменту у вигляді головок на базі високоенергетичних сталей магнітів.

Дослідження процесу МАО деталей різної геометричної форми, аналіз умов формування магнітно-абразивного порошку в процесі обробки в магнітно-абразивний інструмент, виконані в останні роки дозволили сформулювати основні вимоги до процесу, необхідні для забезпечення ефективної обробки:

- забезпечення рівномірного притискання елементів магнітно-абразивного інструменту (МАІ) до оброблюваних поверхонь силами магнітного походження і за рахунок динамічних факторів, що визначаються характером відносного переміщення оброблюваних поверхонь і МАІ;

- наявність достатньої та рівномірно розподіленої щодо оброблюваних поверхонь тангенціальної складової швидкості відносного руху елементів МАІ та поверхонь деталей для забезпечення умов активного пластичного деформування, мікрорізання та скобління поверхневого шару;

- здатність МАІ до стабільного переформування, перемішування та відновлення робочої форми,

- забезпечення рівномірного нівелювання щодо поверхонь деталей, що обробляються без утворення "застійних", "тіньових" зон біля поверхні, що обробляється,

- відсутність факторів, що призводять до викидання або витіснення порошку із зони активної обробки та відносно рівномірний прогнозований його розподіл за робочим обсягом.

Варіювання зазначеними факторами дозволяє у широкому діапазоні вирішувати конкретні технологічні завдання, пов'язані з формуванням мікрогеометрії поверхні деталей, окремих її елементів, фізико-механічних властивостей поверхневого шару на різних етапах як виготовлення, так і відновлення працездатності деталей. При цьому особливу увагу необхідно приділяти процесам, пов'язаним з умовами формування магнітно-абразивного інструменту протягом усього технологічного циклу обробки, особливостями структуроутворення і руху окремих груп частинок. Раніше було показано, що при МАО в умовах великих робочих зазорів взаємодія окремих елементів оброблюваної поверхні з магнітно-абразивним порошком, сформованим в магнітно-абразивний інструмент, доцільно розглядати не як поодинокі акти контактування окремих частинок порошку з оброблюваними поверхнями деталей, а як процес взаємодії окремих груп порошків. При цьому необхідно враховувати градієнт магнітного поля, яке забезпечує певне досить стабільне формування стійких структурних утворень в МАІ.

Огляд досліджень по використанню метода МАО із застосуванням високоенергетичних сталей магнітів показав, що є певні напрацювання при обробленні поверхонь плоских деталей, виготовлених з ферромагнітних матеріалів. Для реалізації процесу МАО використовували спеціальні розроблені торцеві головки [25-31] схематично представлені на рис.1.

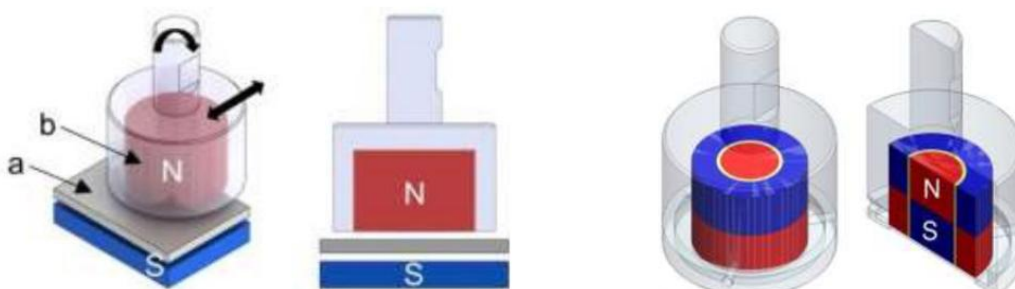




Рис. 1. Схематичне представлення торцевих головок з сталими високоенергетичними магнітами [28]

Досліджено вплив форми робочих поверхонь головок [28,29,31] і розташування магнітів у корпусах на ефективність обробки. Визначено раціональні технологічні параметри (швидкість обробки, величина робочих зазорів, дисперсність і форма частинок МАП, час оброблення). За результатами виконаних досліджень [30] рекомендовано використання головок торцевого типу на базі постійних магнітів для полірування плоских поверхонь феромагнітних деталей на стандартному металообробному обладнанні. Показана можливість високоефективного досягнення шорсткості плоских поверхонь до $Ra < 0,05$ мкм при вихідній шорсткості $Ra > 1-2$ мкм з усуненням технологічної спадковості обробки у вигляді мікрохвилястості, отриманої на операції торцевого фрезерування. Встановлено величини раціональних зазорів залежно від технологічних умов магнітно-абразивної обробки. Виконаний аналіз характеристик мікропрофілю дозволив встановити основні шляхи для цілеспрямованого управління процесом його формування. Показано, що вирішальним технологічним орієнтиром при досягненні мінімальної шорсткості є величина робочого зазору, яка повинна бути не менше ніж 1,5 мм. Найменші зазори можуть бути причиною шаржування магнітно-абразивного порошку в оброблювану поверхню. Необхідно відзначити той факт, що найкращі результати – мінімальна шорсткість після МАО досягається після використання оскольчастих порошоків з середньою величиною зерна на рівні 500 – 600 мкм. [32; 33]

Дослідження різних типів магнітних головок торцевого типу на високоенергетичних постійних магнітах показали, що на робочій торцевій поверхні головок доцільно нанесення виступів різної форми, які забезпечують проведення МАО плоских феромагнітних поверхонь з високою ефективністю, яку характеризували величиною відносної зміни параметра шорсткості - $\Delta Ra/Ra_{вх} > 0,85$ [29-32]. Найкращі результати отримані при величині магнітних зазорів менше 5 мм на торцевих головках, які в процесі МАО формують магнітно-абразивний інструмент у вигляді щітки з робочими поверхнями, на які нанесені виступи у вигляді групи пірамід. Показано, що при вихідній шорсткості поверхні після торцевого фрезерування $Ra = 0,7-1,5$ мкм можливе отримання шорсткості поверхні після МАО з $Ra < 0,05$ мкм з відсутністю хвилястості, що формується на етапі фрезерування. Встановлено, що при частоті обертання торцевих магнітних головок в діапазоні 510-1400 об/хв має місце незначне зростання величини $Ra/Ra_{вх}$ від 0,9 до 0,94 зі зростанням частоти обертання, а шорсткість оброблених поверхонь становить $Ra = 0,03-0,07$ мкм.

В [31,32] наведено результати систематичних досліджень по застосуванню МАІ, сформованого з сумішей магнітно-абразивних порошоків (МАП) з різною формою і розміром частинок. Показано, що для сумішей з крупних і дрібних оскольчастих порошоків Феромап мінімальне значення параметра Ra формується після МАО 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 p свідчить про те, що на фоні зниження параметра R_a з 0,8 мкм до 0,125 мкм, більш розполірований мікропрофіль з меншою кількістю мікроступів і меншою мікрохвилястістю формується при використанні МАІ з сумішею порошків, в яких кількість дрібної фракції не перевищує 40%. Найкращі результати що до параметру R_a і рівня мікрохвилястості поверхонь зразків після МАО отримано при використанні сумішею округлих порошків 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 притира, 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 раза, 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) [31]. При цьому отримано шорсткість оброблених поверхонь з R_a на рівні 0,03 - 0,04 мкм. Аналіз напруженого стану поверхневих шарів зразків після МАО 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 ударно-фрикційної 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 цим в поверхневих шарах зразків формуються від'ємні внутрішні напруження до 100 МПа, проти 30–80 МПа при використанні більш дрібних порошків Феромап та Царамам з розмірами частинок 630/400 мкм [28,30].

Магнітно-абразивне оброблення внутрішніх поверхонь труб принципово відрізняється від оброблення плоских поверхонь і поверхонь великої кривизни. Так при обробленні внутрішніх поверхонь труб великого діаметра доцільно використання пристосування на токарний верстат, схема якого наведена на рис. 2, а, а зовнішній вигляд на рис. 2, б [33]. Для оброблення вигнутих труб запропоновано використання спеціальних головок (рис. 3), у яких сталі магніти Nd-Fe-B для запобігання безпосереднього контакту з оброблюваною поверхнею обернені спеціальною синтетичним матеріалом, у в якому утримується магнітно-абразивний порошок.

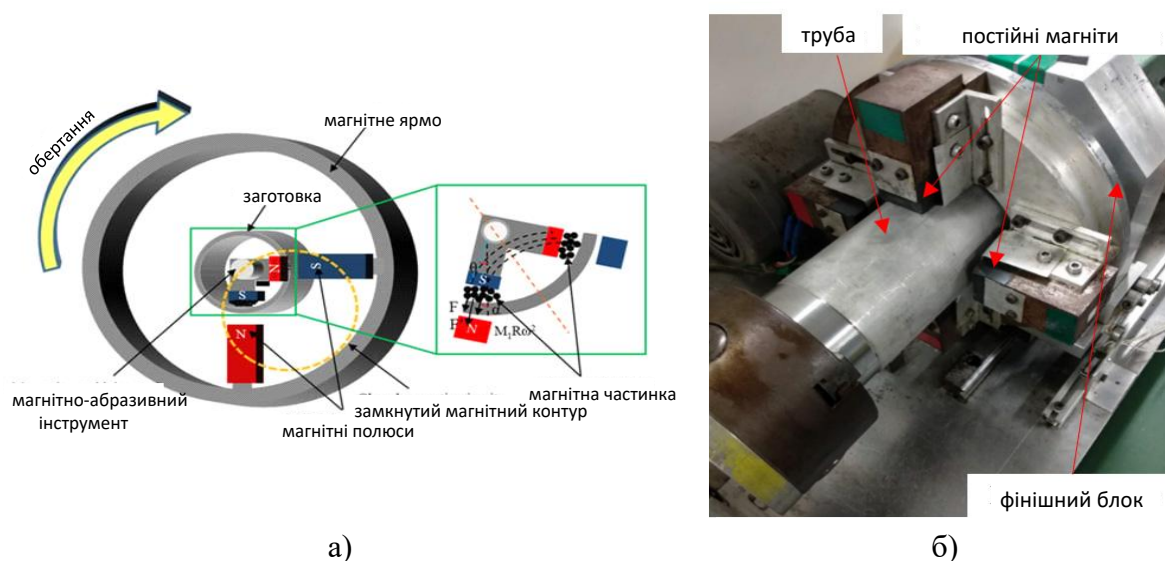


Рис. 2. Схеми MAO для оброблення внутрішніх поверхонь труб великого діаметру [33]

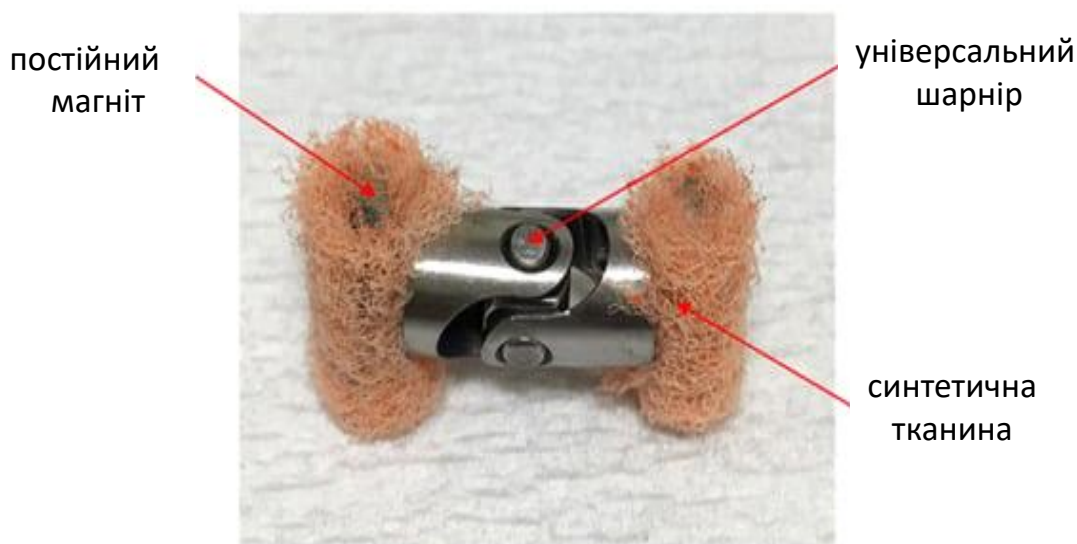


Рис. 3. Спеціальна головка для MAO внутрішніх поверхонь вигнутих труб [33].

Інша принципова схема для оброблення отворів малого діаметра (рис. 4) базується на використанні стрижневої головки периферійного типу з постійними магнітами у вигляді кілець, які встановлювалися протилежними полюсами один до одного на оправці 2. Чотири магнітні неодимові кільця розташовані по відношенню один до одного з протилежною полярністю що забезпечує в робочій зоні сумарну магнітну індукцію 0,8 Тл. Між магнітами встановлені сталеві кільця, які пропускають через себе магнітний потік, що створюється двома сусідніми магнітами. Представлені результати експериментальних досліджень магнітно-абразивної обробки внутрішніх отворів деталей із твердого сплаву 1. Дослідження дозволили визначити наявність раціональних значень зазору між інструментом та заготовкою, швидкостей інструменту та заготовки при MAO. Результати знайшли застосування при фінішній обробці волок.

При створенні головки периферійного типу актуальним є забезпечення розташування високоенергетичних магнітів в корпусі таким чином, щоб була можливість забезпечити рівномірне розподілення магнітної індукції по робочій периферійній поверхні.

Розроблено декілька варіантів конструкцій головок які складаються з немагнітного корпусу, у якому розташовані циліндричні ($\varnothing 12 \times 9$ мм) та призматичні ($25 \times 10 \times 6$ мм) неодилові магніти, немагнітної кришки з ребрами розташованими по гвинтовій поверхні (рис. 4) [34]. Найкращі результати з розподілення магнітного поля по робочій поверхні головки було забезпечено при певному розташуванні магнітів, коли було реалізовано найбільш щільне розподілення магнітної індукції (рис. 5). Робоча головка закріплюється на оправку і може використовуватися на універсальних верстатах. В процесі роботи інструмент може обертатися та виконувати поступальний рух, оброблювана деталь при цьому встановлюється нерухомо. Або оброблювана деталь обертається, а інструмент виконує лише поступальний рух.

Концентрація магнітного поля спостерігається в місцях розташування призматичних магнітів, що забезпечує рівномірний розподіл абразивних зерен у робочій зоні та більшу площу контакту МАІ з оброблюваною поверхнею. За рахунок розташування на периферії ребер відбувається активне перемішування абразивних зерен, яке забезпечує формування стабільного МАІ і можливість зниження шорсткості поверхні до $Ra < 0,05$ мкм.

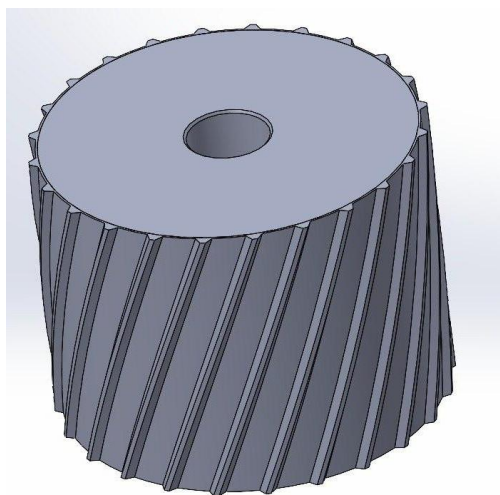


Рис. 4. Зовнішній вигляд головки [34]

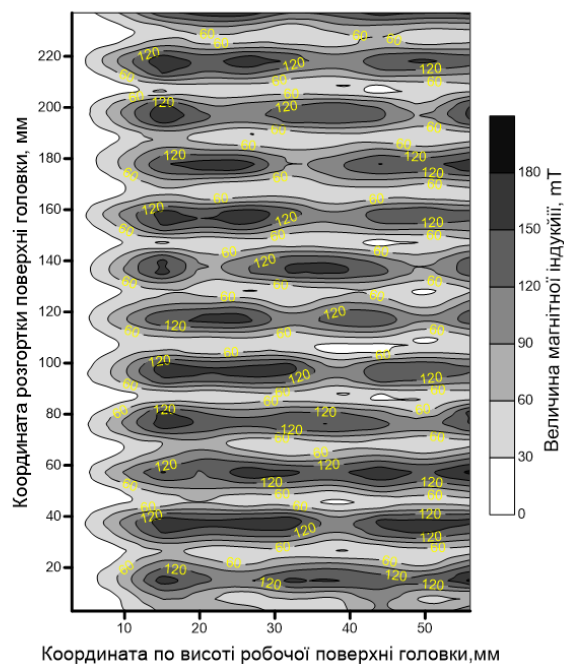


Рис. 5. Характер розподілення магнітної індукції на робочій поверхні інструменту [34]

Висновки. Проведено аналіз методів фінішної обробки деталей різноманітного призначення, що використовують в інструментальному виробництві, виготовлення пресформ, відповідальних деталей силового обладнання - газотурбінних двигунів, парових турбін, турбокомпресорів, виробів медичного призначення – імплантів, медичного інструменту, передових технологій очистки (сверхчисті технології) при виробництві труб для транспортування високочистих газів і рідин. Відмічено особливі вимоги до стану оброблених поверхонь. Обґрунтована доцільність використання методу магнітно-абразивного оброблення з використанням спеціальних мобільних головок торцевого і периферійного типів на базі високоенергетичних магнітів. Показана можливість продуктивного отримання шорсткості оброблених поверхонь спеціальних виробів з $Ra < 0,05$ мкм з підвищеною поверхневою твердістю і залишковими стискаючими напруженнями, величина і глибина яких може корегуватися шляхом зміни технологічних умов процесу МАО.

Список використаної літератури

1. Hashimoto, H., Yamaguchi, H., Krajnik, P., Wegener, K., Chaudhari, R., Hoffmeister, H. W., & Kuster, F. (2016). Abrasive fine-finishing technology. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 65(2), 597–620.
2. Nalimov, Y. S., Maiboroda, V. S., Dzhulii, D. Y., & Teslyuk, M. M. (2020). Effect of complex magnetic-abrasive and chemical-thermal treatment on the fatigue resistance of VT8 alloy compressor blades. *Strength of Materials*, 52(6), 947–952.
3. Nalimov, Y. S., Maiboroda, V. S., Rutkovskiy, A. V., & Teslyuk, M. M. (2023). Effect of combined ion-plasma thermocyclic nitriding and magnetic abrasive treatment on the fatigue resistance of the EK61 alloy. *Strength of Materials*, 1–8.
4. Altan, T., Lilly, B., & Yen, Y. C. (2001). Manufacturing of dies and molds. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 50(2), 405–423.
5. Market Data Forecast. (n.d.). *Injection molding market analysis report*. <https://www.marketdata-forecast.com/market-reports/injection-molding-marke>.
6. VIOPROTO c/o Cast-Solut GmbH. (n.d.). *Spritzgusswerkzeug*. <https://vioproto.de/spritzgusswerkzeug/#>.
7. Klink, A., Arntz, K., Johannsen, L., Holsten, M., Chrubasik, L., Winands, K., Wollbrink, M., Bletek, T., Gerretz, V., & Bergs, T. (2018). Technology-based assessment of subtractive machining processes for mold manufacture. *Procedia CIRP*, 71, 401–406.
8. Grandguillaume, L., Lavernhe, S., Quinsat, Y., & Tournier, C. (2015). Mold manufacturing optimization: A global approach of milling and polishing processes. *Procedia CIRP*, 31, 13–18.
9. Rosemann, B., & Schleicher, A. (2019). Automatisierung der Oberflächen-feinbearbeitung auf CNC-Bearbeitungszentren – Strategieableitung zur Verringerung manueller Nacharbeit. In H. Hoffmeister & B. Denkena (Eds.), *Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren* (pp. 256–270). Essen: Auslage.
10. Wang, K., Dailami, F., & Matthews, J. (2019). Towards collaborative robotic polishing of mould and die sets. *Procedia Manufacturing*, 38, 1499–1507.
11. Klocke, F., Klink, A., Veselovac, D., Aspinwall, D. K., Soo, S. L., Schmidt, M., Schilp, J., Levy, G., & Kruth, J. P. (2014). Turbomachinery component manufacture by application of electrochemical, electro-physical and photonic processes. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 63(2), 703–726.
12. MarketWatch. (2021, August 8). *Aircraft auxiliary power unit market size in 2021: 4.1% CAGR with top countries data, competitive landscape, corporate strategy, share, industry analysis by top manufacturers, growth insights, and forecasts to 2026*. <https://www.marketwatch.com/press-release/aircraft-auxiliary-power-unit-market-size-in-2021-41-cagr-with-top-countries-data-competitive-landscape-corporate-strategy-share-industry-analysis-by-top-manufactures-growth-insights-and-forecasts-to-2026-2021-08-0>.
13. Klocke, F., Soo, S. L., Karpuschewski, B., Webster, J. A., Novovic, D., Elfizy, A., Axinte, D. A., & Tönissen, S. (2015). Abrasive machining of advanced aerospace alloys and composites. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 64(2), 581–604.
14. M'Saoubi, R., Axinte, D., Soo, S. L., Nobel, C., Attia, H., Kappmeyer, G., Engin, S., & Sim, W. M. (2015). High performance cutting of advanced aerospace alloys and composite materials. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 64(2), 557–580.
15. Mitsubishi, M., Cao, J., Bartolo, P., Friedrich, D., Shih, A. J., Rajurkar, K., Sugita, N., & Harada, K. (2013). Biomanufacturing. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 62(2), 585–606.
16. Statista. (n.d.). *Health, pharma & medtech*. <https://www.statista.com/statistics/646258/global-hip-and-knee-reconstruction-market-value-by-region/>.
17. Bartolo, P., Kruth, J. P., Silva, J., Levy, G., Malshe, A., Rajurkar, K., Mitsubishi, M., Ciurana, J., & Leu, M. (2012). Biomedical production of implants by additive electro-chemical and physical processes. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 61(2), 635–655.
18. Axinte, D., Guo, Y., Liao, Z., Shih, A. J., M'Saoubi, R., & Sugita, N. (2019). Machining of biocompatible materials: Recent advances. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 68(2), 629–652.
19. Karpuschewski, B., Kotsun, Y., Maiboroda, V., Borysenko, D., Herbster, M., & Solter, J. (2022). Magnetic-abrasive machining in manufacturing of medical implants. *Procedia CIRP*, 108, 577–582. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.03.091>.

20. Yamaguchi, H., Shinmura, T., & Kobayashi, A. (2001). Development of an internal magnetic abrasive finishing process for nonferromagnetic complex shaped tubes. *JSME International Journal, Series C*, 44, 275–281. <https://doi.org/10.1299/jsmec.44.275>.
21. Kang, J., & Yamaguchi, H. (2012). Internal finishing of capillary tubes by magnetic abrasive finishing using a multiple pole-tip system. *Precision Engineering*, 36, 510–516. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2012.01.006>.
22. Zelinko, A., Welzel, F., Biermann, D., & Maiboroda, V. (2021). Influence of process parameters and initial surface on magnetic abrasive finishing of flat surfaces on CNC machine tools. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 5(4), 108. <https://doi.org/10.3390/jmmp5040108>.
23. Zelinko, A., Welzel, F., Biermann, D., et al. (2022). Tool type and macrostructure for magnetic abrasive finishing of flat surfaces on CNC machine tools. *Production Engineering Research and Development*, 16, 523–533. <https://doi.org/10.1007/s11740-021-01097-5>.
24. Maiboroda, V., Dzhulii, D., & Zelinko, A. (2020). Flat surfaces machining by the magneto-abrasive method with permanent magnet end-type heads. Part 1: The influence of the type of magneto-abrasive powder on the effectiveness of the magneto-abrasive machining. *Mechanics and Advanced Technologies*, 89(2), 75. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2020.89.202696>.
25. Майборода, В. С., Джулій, Д. Ю., Зелінко, А. І., & Буріков, О. О. (2021). Оброблення плоских поверхонь магнітно-абразивним методом торцевими головками з постійних магнітів. Ч. 3: Вплив типу робочих головок на ефективність магнітно-абразивного оброблення. *Mechanics and Advanced Technologies*, 1, 97–102.
26. Буріков, О. О. (2025). Магнітно-абразивне полірування площин індукторами на базі високоенергетичних магнітів [Дисертація доктора філософії]. Київ.
27. Maiboroda, V. S., Beliaiev, 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. [https://doi.org/10.21272/jes.2020.7\(1\).a1](https://doi.org/10.21272/jes.2020.7(1).a1).
28. Zelinko, A. (2022). Magnetabrasives Polieren auf Bearbeitungszentren [Doctoral dissertation]. Dortmund, Germany.
29. Майборода, В., & Буріков, О. (2024). Магнітно-абразивне оброблення плоских поверхонь ферромагнітних деталей торцевими головками на базі високоенергетичних магнітів. *Технічні науки та технології*, 4 (38), 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).
30. Maiboroda, V., Dzhulii, D., Zelinko, A., & Burikov, A. (2021). 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*, 5(1), 97–102. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2021.5.1.229813>.
31. Джулій, Д., Майборода, В., Буріков, О., & Беляєв, О. (2025). Формування мікропрофілю поверхонь виробу при магнітно-абразивному обробленні площин головками на базі високоенергетичних постійних магнітів. *Mechanics and Advanced Technologies*, 9(1(104)), 114–118. [https://doi.org/10.20535/2521-1943.2025.9.1\(104\).324280](https://doi.org/10.20535/2521-1943.2025.9.1(104).324280).
32. Буріков, О., Джулій, Д., & Майборода, В. (2022). Вплив магнітно-абразивного оброблення на характеристики поверхневого шару плоских деталей. *Mechanics and Advanced Technologies*, 6(3), 286–292. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2022.6.3.265948>.
33. Liu, J., & Zou, Y. (2022). Study on mechanism of roundness improvement by the internal magnetic abrasive finishing process using magnetic machining tool. *Machines*, 10(2), 112. <https://doi.org/10.3390/machines10020112>.
34. Григор'єв, Ю. О., Майборода, В. С., Джулій, Д. Ю., & Слободянюк, І. В. (2025). Інструмент для оброблення внутрішніх циліндричних поверхонь. У *Тези доповідей міжнародної наукової конференції «Інновації молоді в машинобудуванні»* (с. 23–25). Київ.

References

1. 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.
2. Nalimov Y.S., Maiboroda V.S, Dzhulii D.Y., Teslyuk M.M. [Effect of Complex Magnetic-Abrasive and Chemical-Thermal Treatment on the Fatigue Resistance of VT8 Alloy Compressor Blades/ Strength of Materials](#), 2020. - Vol. 52 (6). - P.947-952.

3. Nalimov Y.S. Effect of Combined Ion-Plasma Thermocyclic Nitriding and Magnetic Abrasive Treatment on the Fatigue Resistance of the EK61 Alloy./ Y.S. Nalimov, V.S.Maiboroda, A.V. Rutkovskiy, M.M.Teslyuk // *Strength of Materials*, 2023, p. 1-8.
4. Altan, T.; Lilly, B.; Yen, Y.C.: Manufacturing of Dies and Molds, in *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 50/2, S. 405-423, 2001
5. Webseite von Market Data Forecast: Injection Molding Market Analysis Report, <https://www.marketdataforecast.com/market-reports/injection-molding-marke>, Zugriff am 23.09.2020
6. Webseite von VIOPROTO c/o Cast-Solut GmbH, <https://vioproto.de/spritzgusswerkzeug/#>, Zugriff am 29.09.2021
7. Klink, A.; Arntz, K.; Johannsen, L.; Holsten, M.; Chrubasik, L.; Winands, K.; Wollbrink, M.; Bletek, T.; Gerretz, V.; Bergs, T.: Technology-based assessment of subtractive machining processes for mold manufacture, in *Procedia CIRP* 71, S. 401-406, 2018
8. Grandguillaume, L.; Lavernhe, S.; Quinsat, Y.; Tournier, C.: Mold manufacturing optimization: a global approach of milling and polishing processes, in *Procedia CIRP* 31, S. 13-18, 2015.
9. Rosemann, B.; Schleicher, A.: Automatisierung der Oberflächen-feinbearbeitung auf CNC-Bearbeitungszentren – Strategieableitung zur Verringerung manueller Nacharbeit, in *Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren, Auslage, Essen, Hoffmeister + Denkena (Hrsg.)*, S. 256-270, 2019.
10. Wang, K.; Dailami, F.; Matthews, J.: Towards collaborative robotic polishing of mould and die sets, in *Procedia Manufacturing* 38, S. 1499-1507, 2019.
11. Klocke, F.; Klink, A.; Veselovac, D.; Aspinwall, D.K.; Soo, S.L.; Schmidt, M.; Schilp, J.; Levy, G.; Kruth, J.P.: Turbomachinery component manufacture by application of electrochemical, electro-physical and photonic processes, in *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 63/2, S. 703-726, 2014.
12. Webseite von Market Watch: Aircraft Power Unit Market Size, <https://www.marketwatch.com/press-release/aircraft-auxiliary-power-unit-market-size-in-2021-41-cagr-with-top-countries-data-competitive-landscape-corporate-strategy-share-industry-analysis-by-top-manufactures-growth-insights-and-forecasts-to-2026-2021-08-08>, Zugriff am 29.09.2021.
13. Klocke, F.; Soo, S.L.; Karpuschewski, B.; Webster, J.A.; Novovic, D.; Elfizy, A.; Axinte, D.A.; Tönissen, S.: Abrasive machining of advanced aerospace alloys and composites, in *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 64/2, S. 581-604, 2015.
14. M'Saoubi, R.; Axinte, D.; Soo, S.L.; Nobel, C.; Attia, H.; Kappmeyer, G.; Engin, S.; Sim, W.M.: High performance cutting of advanced aerospace alloys and composite materials, in *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 64/2, S. 557-580, 2015
15. Mitsuiishi, M.; Cao, J.; Bartolo, P.; Friedrich, D.; Shih, A.J.; Rajurkar, K.; Sugita, N.; Harada, K.: Biomanufacturing, in *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 62/2, S. 585-606, 2013
16. Webseite von Statista: Health, Pharma & Medtech, <https://www.statista.com/statistics/646258/global-hip-and-knee-reconstruction-market-value-by-region/>, Zugriff am 13.07.2020.
17. Bartolo, P.; Kruth, J.P.; Silva, J.; Levy, G.; Malshe, A.; Rajurkar, K.; Mitsuiishi, M.; Ciurana, J.; Leu, M.: Biomedical production of implants by additive electro-chemical and physical processes, in *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 61/2, S. 635-655, 2012.
18. Axinte, D.; Guo, Y.; Liao, Z.; Shih, A.J.; M'Saoubi, R.; Sugita, N.: Machining of biocompatible materials - Recent advances, in *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 68/2, S. 629-652, 2019.
19. Karpuschewski B., Kotsun Yu., Maiboroda V., Borysenko D., Herbster M., Solter J.: Magnetic-abrasive machining in manufacturing of medical implants, 6th CIRP Conference on Surface Integrity (CSI2022). *Procedia CIRP.* - 108.-2022.-P. 577–582. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.03.091>
20. Yamaguchi, H.; Shinmura, T.; Kobayashi, A. Development of an internal magnetic abrasive finishing process for nonferromagnetic complex shaped tubes. *JSME Int. J. Ser. C* 2001, 44, 275–281. <https://doi.org/10.1299/jsmec.44.275>.
21. Kang, J.; Yamaguchi, H. Internal finishing of capillary tubes by magnetic abrasive finishing using a multiple pole-tip system. *Precis. Eng.* 2012, 36, 510–516. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2012.01.006>.
22. 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>
23. 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>

24. 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>

25. Maiboroda V. S. Obroblennia ploskykh poverkhon mahnitno-abrazyvnyim metodom tortsevymy holovkamy z postiinykh mahnitakh 3. Vplyv typu robochykh holovok na efektyvnist mahnitno-abrazyvnoho obroblennia. / V. S. Maiboroda, D. Yu. Dzhulii, A. Y. Zelinko, O. O. Burikov // *Mechanics and Advanced Technologies*. – 2021. – No. 1. – S. 97-102.

26. Burikov O.O. Mahnitno-abrazyvne poliruvannia ploschyn induktoramy na bazi vysokoenerhetychnykh mahnitiv. : dys. ... dok. filosofii / Burikov Oleksii Olehovych. – Kyiv, 2025. – 145 s.

27. Maiboroda V.S., Belajev O.O., Dzhulii D.Yu., Slobodianiuk I.V. AISI 1045 steel flat surfaces machining using the magneto-abrasive method. *J. Eng. Sci.* 2020. Vol. 7(1). P. A1–A7. DOI: 10.21272/jes.2020.7(1) a1.

28. Zelinko A. Magnetabrasives Polieren auf Bearbeitungszentren. Dissertation Dr.-Ing. – Dortmund, Germany, 2022.-153 p.

29. Maiboroda V.S. Mahnitno-abrazyvne obroblennia ploskykh poverkhon feromahnitnykh detalei tortsevymy holovkamy na bazi vysokoenerhetychnykh mahnitiv /V.S. Maiboroda, O.O.Burikov// *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii* – 2024. - №4(38). – S.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).

30. Maiboroda V. 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. doi: 10.20535/2521-1943.2021.5.1.229813.

31. Maiboroda V.S. Formuvannia mikroprofilu poverkhon vyrobu pry mahnitno-abrazyvnomu obroblenni ploschyn holovkamy na bazi vysokoenerhetychnykh stalykh mahnitiv./ V. S. Maiboroda , D. Yu. Dzhulii, O. O. Burikov, O.Bieliaiev// *Mechanics and Advanced Technologies*. – 2025. vol. 9, №1(104) - S.114-118. doi: [https://doi.org/10.20535/2521-1943.2025.9.1\(104\).324280](https://doi.org/10.20535/2521-1943.2025.9.1(104).324280).

32. Burikov O.O. Vplyv mahnitno-abrazyvnoho obroblennia na kharakterystyky poverkhnevoho sharu ploskykh detalei. /O.O.Burikov, D.Iu.Dzhulii, V.S.Maiboroda // *Mechanics and Advanced Technologies*. - 2022. - Tom 6, №3. – s.286-292 . DOI:<https://doi.org/10.20535/2521-1943.2022.6.3.26594>

33. Jiangnan Liu, Yanhua Zou* Study on Mechanism of Roundness Improvement by the Internal Magnetic Abrasive Finishing Process Using Magnetic Machining Tool/*Machines* 2022, 10(2), 112; <https://doi.org/10.3390/machines10020112>.

34. Hryhoriev Yu.O. Instrument dlia obroblennia vnutrishnykh tsylindrychnykh poverkhon/ Yu.O.Hryhoriev, V.S. Maiboroda, D.Iu. Dzhulii, I.V. Slobodianiuk// *Tezy dopovidei mizhnarodnoi nauk. konf. «Innovatsii molodi v mashynobuduvanni»*.- Kyiv – 2025. – s.23-25.

Дата першого надходження статті до видання: 02.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 22.03.2026

UDC 621.923

Iurii Grygoriev¹, Victor Maiboroda²

¹PhD student at the Department of Machine Design
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)
E-mail: 0240596@gmail.com

²Doctor 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

ANALYSIS OF THE PROSPECTS OF THE APPLICATION OF HIGH-ENERGY PERMANENT MAGNETS FOR FINISHING PARTS OF COMPLEX SHAPES BY THE MAGNETIC-ABRASIVE METHOD

The article addresses the problem of finishing complex-shaped parts with high surface quality requirements ($R_a < 0.05 \mu\text{m}$), residual stress level, and surface hardness. Limitations of conventional methods (grinding, manual polishing, electrochemical machining) are analyzed in such industries as mold manufacturing, aircraft engine building, medical implantology, and ultra-clean technologies. It is shown that manual polishing remains dominant but is characterized by low productivity and high labor intensity.

The feasibility of using magnetic abrasive machining (MAM) with a tool based on high-energy permanent magnets (Nd-Fe-B) integrated into CNC machine tools is substantiated. Two design schemes are analyzed in detail: end-type heads for flat surfaces and peripheral heads for internal cylindrical and curved surfaces. Experimental results are presented on the influence of the working surface shape of the heads, working gap size, dispersion and shape of magnetic abrasive powders (Feromap, DC, diamond pastes) on the achieved roughness, microhardness, and residual stresses.

It has been established that rational parameters (gap ≥ 1.5 mm, rotation speed 510–1400 rpm, mixtures of crushed and rounded powders) allow stable achievement of roughness $Ra < 0.05 \mu\text{m}$, an increase in surface hardness by a factor of 1.4, and the formation of compressive residual stresses up to -100 MPa. Special features of MAM of internal pipe surfaces of various diameters are considered, in particular using rod-type heads with ring magnets.

It is concluded that the use of mobile magnetic abrasive heads on CNC machine tools is a promising direction for automating finishing operations, allowing controlled formation of microgeometry and physical-mechanical properties of the surface layer without manual labor.

Keywords. magnetic abrasive machining, end heads, peripheral heads, magnetic abrasive powders, surface microgeometry, roughness, high-energy magnets.

Fig.: 5. References: 34.