

**МАЙБОРОДА В. С., ДЖУЛІЙ Д. Ю., БЕСАРАБЕЦЬ Ю. Й., СЛОБОДЯНЮК І. В.,  
ЗАСТАВСЬКИЙ К. О.**

### **ДОСЛІДЖЕННЯ СИЛ ЛОБОВОГО ОПОРУ, ЩО ВИНИКАЮТЬ В МАГНІТНО-АБРАЗИВНОМУ ІНСТРУМЕНТІ ПРИ ОБРОБЛЕННІ ЦИЛІНДРИЧНИХ ДЕТАЛЕЙ В КІЛЬЦЕВІЙ ВАННІ**

Розроблено методику та виконано систематичні дослідження по вимірюванню сил лобового опору, що виникають в магнітно-абразивному інструменті (МАІ) при обробленні циліндричних деталей діаметром 16 мм і висотою 30 мм, виготовлених з пара-, феро- та діамантних матеріалів, в кільцевій камері діаметром 200 мм з робочою висотою 30 мм при швидкостях оброблення в діапазоні 1–3 м/с, магнітній індукції в робочих зонах, що змінюється в діапазоні 0,2–0,25 Тл. Показано, що сили опору суттєво залежать від магнітних та реологічних властивостей магнітно-абразивного інструменту. При магнітно-абразивному обробленні (МАО) лобовий опір для немагнітних деталей практично однаковий і не залежить від швидкості оброблення, а зі збільшенням магнітної індукції у робочих зонах місце його лінійне зростання. Коефіцієнт збільшення лобового опору, що визначається магнітним полем, для порошків розміром частинок 400/315 мкм становить 960 Н/Тл, а для розміру 200/100 мкм – 720 Н/Тл. Показано, що сили лобового опору при МАО ферромагнітних зразків змінюються в діапазоні від 160 до 220 Н та в 1,2–1,45 разів вищі, ніж для немагнітних деталей, що пов'язано з дією сил магнітного походження, особливостями взаємодії структурних елементів МАІ з оброблюваними поверхнями та формуванням зон заклинювання між поверхнею деталі та полюсними наконечниками кільцевої ванни. Встановлено періодичну зміну сил опору МАІ оброблюваної деталі поблизу їх середнього значення, а при підвищених швидкостях МАО понад 2–2,5 м/с зафіксовані нестійкості, пов'язані з періодичним зменшенням амплітуд коливань сил опору внаслідок перебудови, зміни розмірів та об'ємів структурних елементів магнітно-абразивного інструменту та умов їх взаємодії з оброблюваними поверхнями.

**Ключові слова:** магнітно-абразивне оброблення, магнітно-абразивний інструмент, сила лобового опору, магнітна індукція, кільцева робоча зона.

**МАЙБОРОДА В. С., ДЖУЛІЙ Д. Ю., БЕСАРАБЕЦЬ Ю. Й., СЛОБОДЯНЮК І. В., ЗАСТАВСЬКИЙ К. О.  
ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛ ЛОБОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ, ВОЗНИКАЮЩИХ В МАГНИТНО-АБРАЗИВНОМ  
ИНСТРУМЕНТЕ ПРИ ОБРАБОТКЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ В КОЛЬЦЕВОЙ ВАННЕ**

Разработана методика и выполнены систематические исследования по измерению сил лобового сопротивления, оказываемого магнитно-абразивным инструментом (МАИ) обрабатываемым цилиндрическим деталям диаметром 16 мм и высотой 30 мм, изготовленным из пара-, ферро- и диамагнитных материалов, в кольцевой камере диаметром 200 мм с рабочей высотой 30 мм при скоростях обработки в диапазоне 1–3 м/с, магнитной индукции в рабочих зонах изменяющейся в диапазоне 0,2–0,25 Тл. Показано, что силы сопротивления существенно зависят от магнитных и реологических свойств магнитно-абразивного инструмента. При магнитно-абразивной обработке (МАО) лобовое сопротивление для немагнитных деталей практически одинаковые и не зависят от скорости обработки, а с увеличением магнитной индукции в рабочих зонах имеет место его линейный рост. Коэффициент увеличения лобового сопротивления, определяемый магнитным полем, для порошков с размером частиц 400/315 мкм составляет 960 Н/Тл, а для размера 200/100 мкм – 720 Н/Тл. Показано, что силы лобового сопротивления при МАО ферромагнитных образцов изменяются в диапазоне от 160 до 220 Н и в 1,2–1,45 раз выше, чем для немагнитных деталей, что связано с действием сил магнитного происхождения, особенностями взаимодействия структурных элементов МАИ с обрабатываемыми поверхностями и формированием зон заклинивания между поверхностью детали и полюсными наконечниками кольцевой ванны. Установлено периодическое изменение сил сопротивления МАИ обрабатываемой детали вблизи их среднего значения, а при повышенных скоростях МАО более 2–2,5 м/с зафиксированы неустойчивости, связанные с периодическим уменьшением амплитуд колебаний сил сопротивления в результате перестройки, изменения размеров и объемов структурных элементов магнитно-абразивного инструмента и условий их взаимодействия с обрабатываемыми поверхностями.

**Ключевые слова:** магнитно-абразивная обработка, магнитно-абразивный инструмент, сила лобового сопротивления, магнитная индукция, кольцевая рабочая зона.

**MAIBORODA V. S., DZHULII D. Yu., BESARABETS Yu. Jo., SLOBODIANIUK I. V., ZASTAVSKIY K. O.  
INVESTIGATION OF THE DRAG FORCES ARISING IN THE MAGNETO-ABRASIVE TOOL DURING THE FINISHING OF  
CYLINDRICAL PARTS IN THE ANNULAR BATH**

The method has been developed and systematic studies have been carried out to measure the drag forces, that exerted by a magneto-abrasive tool on machined cylindrical parts with a diameter of 16 mm and the height of 30 mm, made of para-, ferro- and diamagnetic materials, in an annular working zone with the diameter of 200 mm with the working height of 30 mm at machining speeds in the range of 1 - 3 m / s, magnetic induction in the working areas varying in the range of 0.2 - 0.25 T. It is shown that the drag forces significantly depend on the magnetic and rheological properties of the magneto-abrasive tool. During magneto-abrasive finishing (MAF), the drag force for non-magnetic parts is almost the same and does not depend on the machining speed, and with an increase in magnetic induction in the working areas, its linear growth takes place. The coefficient of magnification of drag force determined by the magnetic field, for powders with a particle size of 400/315 μm is 960 N/T, and for a size of 200/100 μm it is 720 N/T. It is shown that the drag forces during the MAF of ferromagnetic parts vary in the range from 160 to 220 N and are 1.2–1.45 times higher than for non-magnetic parts, which is due to the action of forces of magnetic origin, the features of the interaction of structural elements of MAT with machined surfaces and the formation of blocking up zones between the surface of the part and the pole pieces of the annular bath. The periodic change in the drag forces of the MAT of the workpiece was established near their average value, and at elevated MAF speeds of more than 2–2.5 m/s, instabilities were recorded associated with a periodic decrease in the oscillation amplitudes of the drag forces as a result of rearrangement, changes in the dimensions and volumes of the structural elements of the magneto-abrasive tool and the conditions of their interaction with the machined surfaces.

**Keywords:** magneto-abrasive finishing, magneto-abrasive tool, drag force, magnetic induction, annular working area

**Вступ.** Ефективність процесу магнітно-абразивної обробки (МАО) в умовах кільцевого розташування робочих зазорів та слабких магнітних полів у них (магнітна індукція в зонах оброблення не перевищує 0,5 Тл) істотно залежатиме від сил, величина яких визначатиметься швидкістю та траєкторією переміщення деталей в магнітно-абразивному інструменті (МАІ), що формується в процесі МАО, величини магнітного поля в робочих зазорах, характеристик застосовуваних магнітно-абразивних порошоків і безпосередньо властивостей самої деталі. Зазначені фактори безпосередньо визначають особливості формування та переформування МАІ в процесі МАО, силами опору, які спричиняє МАІ деталям, які рухаються. Саме ці сили дозволять встановити реальні значення сил, з якими здійснюється притиснення окремих частинок та їх груп до оброблюваних поверхонь. Дослідження характеру зміни зазначених сил для процесу МАО у кільцевій ванні залежно від технологічних режимів оброблення практично відсутні. Окремі результати, отримані в результаті непрямих досліджень та розрахунків представлені в [1, 2]. В останні роки виконано теоретичний аналіз кінематичних особливостей процесу МАО реальних деталей в кільцевій робочій зоні, який дозволив встановити енергетичні параметри, виражені через інтегральні інтенсивності оброблення різних ділянок робочих поверхонь реальних виробів [3 – 6]. Отримані результати розрахунків дозволяють виконати орієнтовну відносну оцінку сил, що діють на різні ділянки поверхонь деталей. Але при цьому не враховуються характеристики магнітно-абразивних порошоків, величина магнітного поля в робочих зазорах, магнітні властивості матеріалу оброблюваних деталей, особливості контактної взаємодії МАІ з оброблюваними поверхнями, що проявляється в структуруванні МАІ в квазістабільні утворення у вигляді конусоподібних стовпчиків і веретенподібних формувань [1, 2, 7].

Отримання даних про реальні сили опору переміщенню деталей у МАІ при МАО безсумнівно є актуальною задачею, вирішення якої дозволить не тільки визначити сили, з якими МАІ діє на оброблювані поверхні, а й ідентифікувати особливості формування МАІ. Складність вирішення цієї задачі полягає в тому, що відсутні методики вимірювання реальних сил опору, а запропоновані раніше базуються на аналізі непрямих характеристик, які, згодом, з певними припущеннями перераховувалися і в ряді випадків не завжди відповідали дійсності [2, 8 – 10]. При цьому необхідно розділяти дію сил тангенціального та нормального походження [11]. Дослідження тангенціальних сил, що виникають у кільцевих зонах оброблення залежно від швидкості руху деталей, магнітного поля, застосовуваного магнітно-абразивного порошку, виконані за модифікованою методикою, описаною в [1, 12] для феро-, пара- та діамантних зразків наведені в [13]. Мали місце окремі спроби вимірювання сил нормального опору, які спричиняє МАІ магнітним зразкам, що рухаються в кільцевій ванні в умовах слабких магнітних полів. Проте як систематичних досліджень, так і налагодженої методики вимірювання зазначених сил не наводилося.

**Мета роботи.** Розроблення методики вимірювання сил нормального походження – сил опору, які спричиняє МАІ, що формується в кільцевій робочій зоні, рухомим деталям, виготовленим з пара-, феро- та діамантних матеріалів та дослідження впливу на зазначені сили швидкості обертання деталей навколо осі кільцевої ванни, магнітної індукції в робочих зазорах, типу магнітно-абразивного порошку, його розмірів та форми частинок.

Для вимірювання сил нормального опору використовували динамометричний елемент у вигляді балки спеціальної конструкції з тензодатчиками, що дозволяє фіксувати в реальному часі зусилля в діапазоні 0 – 400 Н. Динамометричний елемент жорстко закріплювався в спеціальній оправці, встановленій на головці установки типу кільцева ванна [1, 3, 10]. Спеціальна оправка забезпечує можливість повороту динамометричного елемента із закріпленням на ньому досліджуванім зразком навколо вертикальної осі та контрольоване радіальне переміщення. Тарування пристосування у зборі виконували шляхом прикладання до досліджуваного зразка навантажень, що імітують дію МАІ в процесі МАО. Вектор прикладеного контрольованого навантаження співпадав із вектором обертання навколо осі кільцевої ванни. Сигнал з динамометричного елемента реєструвався, оброблявся та передавався на комп'ютер, частота виконання вимірювань становила 10 Гц. Отримана інформація записувалася на комп'ютері в txt-файл, який в подальшому конвертували у формат, придатний для подальшого аналізу.

Вимірювання сил опору, що виникають з боку МАІ в процесі МАО оброблюваної деталі, виконували на зразках, виготовлених із трьох типів матеріалів: феромагнітної сталі 40Х13, парамагнітних сплавів алюмінію – Д16Т та титану – ВТ 8 та діамантної бронзи БрОц. Оброблення виконували в кільцевій камері діаметром 200 мм з шириною робочого зазору 35 мм та висотою 30 мм. В якості контрольних зразків використовували циліндричні деталі діаметром 16 мм і висотою 30 мм. Оброблення виконували магнітно-абразивними порошками двох типів – Полімам-М з округлими нерівновісними частинками розміром 200/100 мкм та 400/315 мкм, та Феромап – осколковими рівновісними частинками з аналогічними розмірами [1, 12, 14]. Варіювали швидкість обертання деталей навколо осі кільцевої ванни в діапазоні 100 – 300 об/хв, що відповідає лінійній швидкості МАО – 1 – 3 м/с, магнітною індукцією у робочій зоні у діапазоні 0,2 – 0,25 Тл. В кожному циклі вимірювань при фіксованих значеннях швидкості обертання та магнітної індукції здійснювали запис не менше 300 показань, що передавались з вимірювального динамометричного елемента. Отримані результати обробляли та визначали середню величину сили опору, отриману за цикл оброблення. Результати вимірювань середніх значень сил опору в залежності від швидкості руху в кільцевій ванні при різних фіксованих значеннях магнітної індукції при МАО немагнітних матеріалів – бронзи, сплавів титану та алюмінію практично не відрізняються один від одного. Враховуючи зазначене вище, подальший аналіз результатів вимірювань доцільно проводити за усередненими значеннями, отриманими для пара- і діамантних матеріалів. Отримані усереднені результати представлені для чотирьох магнітно-абразивних порошоків на рис. 1. Встановлено, що зі збільшенням магнітної індукції у робочих зонах має місце лінійне зростання сил опору. Коефіцієнт збільшення сил опору для порошоків з розміром частинок 400/315 мкм становить 960 Н/Тл, а для розміру 200/100 мкм – 720 Н/Тл. Це пов'язано зі збільшенням сил магнітного походження, які безпосередньо визначають жорсткість МАІ, його підвищений опір до зміни форми при МАО. Важливо відзначити, що при обробленні порошком Полімам-М сили

опору, як правило, вище в 1,2 – 1,3 рази, ніж при MAO порошком Феромап. Цей факт можна пояснити кращими магнітними та реологічними властивостями MAI, сформованого з магнітно-абразивного порошку Полімам-М [1]. Зміни середніх сил опору в залежності від швидкості обертання деталей навколо осі кільцевої ванни, отримані при MAO порошками розміром частинок 200/100 мкм несуттєві і знаходяться в діапазоні 6 – 9 Н і можуть бути віднесені до похибок пов'язаних з виконанням процесу MAO.

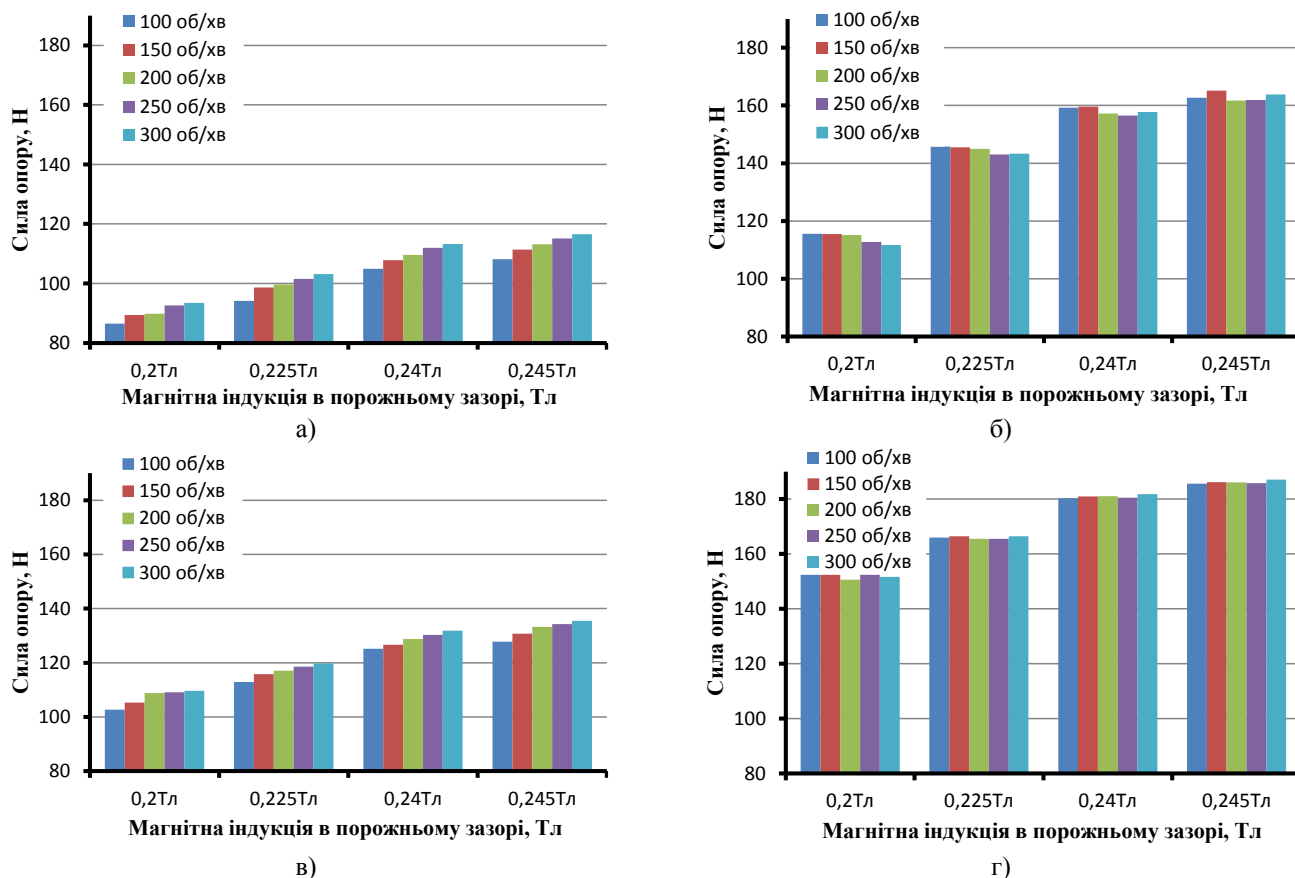


Рис. 1 – Зміна сил опору з боку MAI рухаючимися немагнітним зразкам, які виготовлені з Д16Т, ВТ 8, БрОц при MAO порошком Феромап з розміром частинок 200/100 мкм – а), 400/315 мкм – б) і порошком Полімам-М з розміром частинок 200/100 мкм – в) та 400/315 мкм – г)

При MAO феромагнітних зразків, виготовлених зі сталі 40Х13, незважаючи на більші значення сил опору, ніж при MAO немагнітних зразків, зазначені вище закономірності зберігаються при зміні магнітної індукції в зонах оброблення, тоді як зміна швидкостей обертання навколо осі кільцевої ванни практично не впливає на сили опору, спричинені MAI оброблюваним деталям. Характер зміни усереднених сил опору при MAO феромагнітних зразків представлено на рис. 2. Так при магнітній індукції в робочих зазорах 0,2 Тл сила опору становить 131 – 133 Н, а при 0,245 Тл відповідно 154 – 156 Н. Збільшення сил опору при MAO феромагнітної деталі закономірно, так як магнітна складова сил взаємодії більша і зразку, що рухається, складніше розривати квазістабільні утворення у вигляді веретеноподібних ущільнень, що формуються в процесі MAO перед деталлю. Крім того частина порошку, що знаходиться на кінцях віялоподібних формувань [15] активно взаємодіє з конусоподібними стовпчиками, які розташовуються на поверхні полюсів робочої камери, збільшують їх щільність, внаслідок чого підвищується ймовірність формування зон заклинювання в MAI між поверхнею деталі та полюсними наконечниками.

Цьому сприяє і магнітне поле, оскільки феромагнітна деталь є концентратором магнітного поля і призводить до істотної зміни його градієнта в об'ємі магнітного зазору. Має місце ріст магнітної індукції в зазорі між поверхнею деталі та полюсом, що створює передумови для зміщення окремих об'ємів порошку із середньої частини зазору до полюсних наконечників – в області з підвищеною магнітною індукцією та додаткового ущільнення MAI.

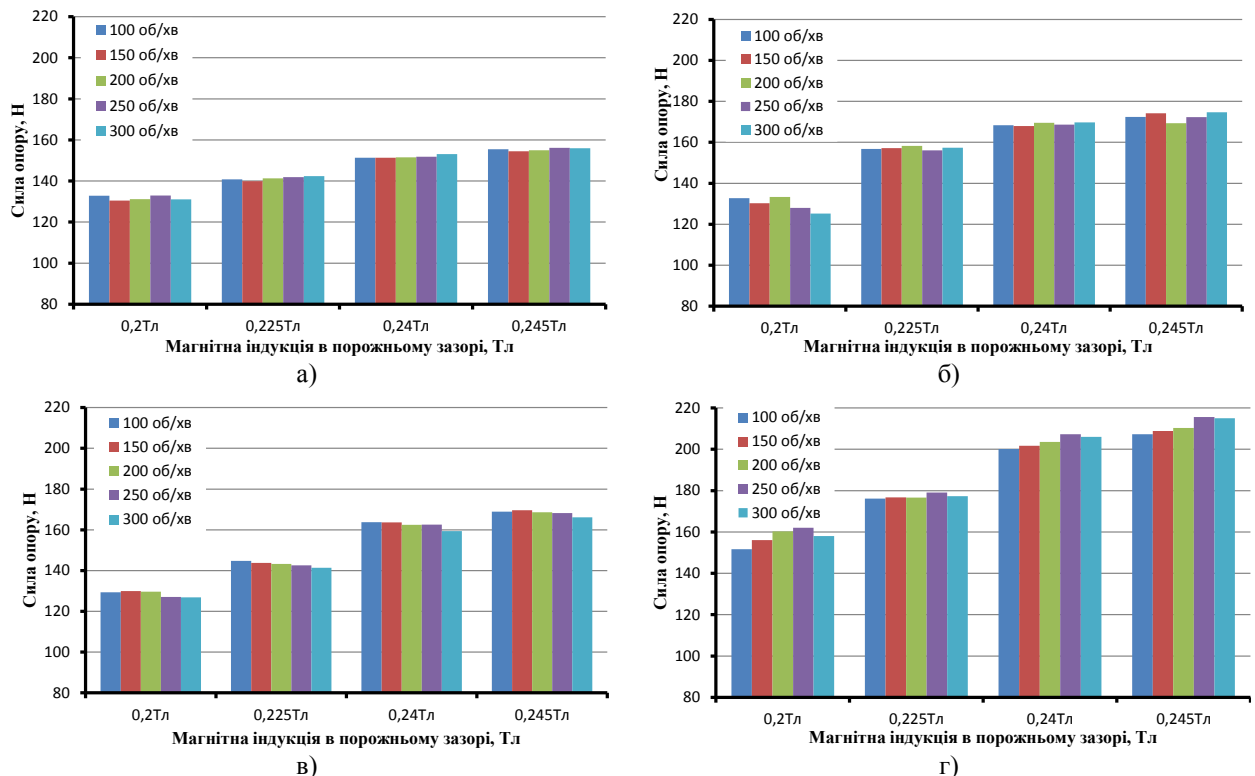


Рис. 2 – Зміна сил опору з боку МАІ рухаючимс я феромагнітним зразкам, які виготовлені зі сталі 40Х13 при МАО порошком Феромап з розміром частинок 200/100 мкм – а), 400/315 мкм – б) і порошком Полімам-М з розміром частинок 200/100 мкм та 400/315 мкм – г)

Підтвердженням зазначеного факту є топограми зміни величини магнітної індукції в робочих зазорах, заповнених порошком з оброблюваною феромагнітною деталлю і без неї (рис. 3). Формування зон заклинювання сприяє зростанню сил опору, що може бути пов'язане з псевдозбільшенням поперечного перерізу деталі частинками порошку, що знаходяться в малорухливому стані на поверхні феромагнітних деталей.

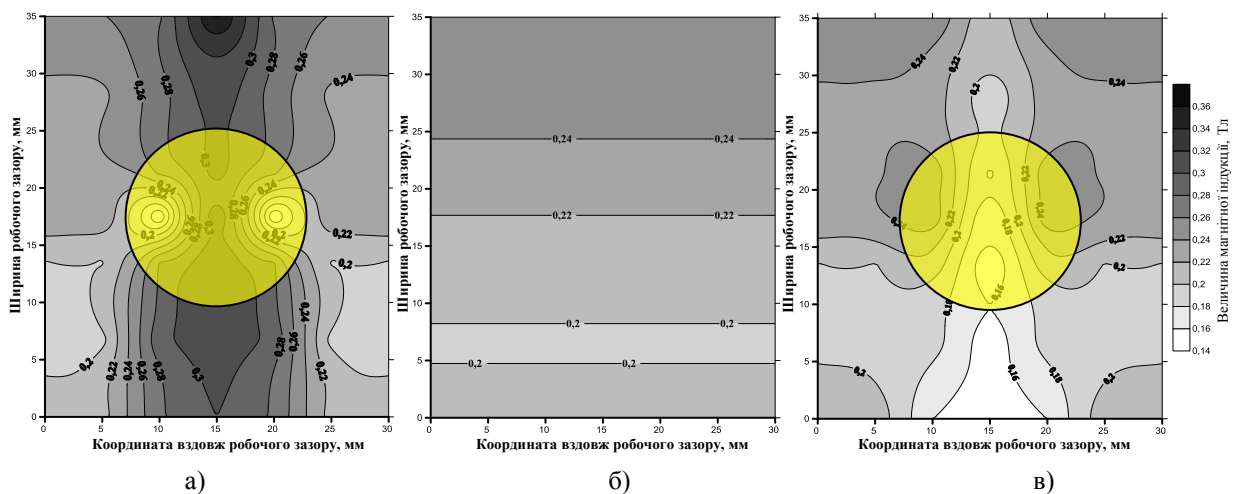


Рис. 3 – Характер зміни магнітного поля в робочих зонах кільцевої ванни заповнених порошком Феромап з феромагнітною деталлю – а), без обробленої деталі – б), в) – з діамагнітною деталлю

Аналіз отриманих топограм зміни величини магнітної індукції в робочих зазорах поблизу оброблюваних деталей, виготовлених з магнітних і немагнітних матеріалів дозволив встановити, що при обробленні феромагнітних деталей в зазорі між поверхнею зразка та поверхнею полюсного наконечника має місце збільшення не менше ніж на 40% магнітної індукції, а для діамагнітних деталей – понад 30% зниження. Подібний перерозподіл магнітного поля сприятиме перерозподілу магнітно-абразивного порошку в зонах оброблення, який при МАО феромагнітних деталей зміщуватиметься в області з підвищеною магнітною індукцією, формуючи в них зони заклинювання і, відповідно, при МАО немагнітних деталей прагнути переміститися з областей з пониженою, у напрямку до областей з вищою магнітною індукцією. Найявність подібного ефекту, який має місце в області між полюсом і поверхнею деталі, так званої пригратиної області, де можливе формування так званої "мертвої зони" [7, 10, 15], де магнітно-абразивний порошок мало рухомий вимагає додаткового дослідження.

Подальші дослідження виконували при MAO феромагнітної сталі 40X13 та парамагнітного сплаву титану BT 8.

Встановлено періодичну зміну сил опору MAI оброблюваній деталі поблизу їхнього середнього значення. Характерні залежності зміни сил опору при MAO як магнітних, так і немагнітних зразків представлені на прикладі оброблення феромагнітної сталі 40X13 порошком Полімам-М на рис. 4.

Подібні залежності зміни сил опору MAI при MAO характерні як для магнітних, так і немагнітних зразків. Слід зазначити, що при підвищених швидкостях MAO більше 2 – 2,5 м/с мають місце нестійкості, пов'язані з періодичним зменшенням величини амплітуд коливань сил опору.

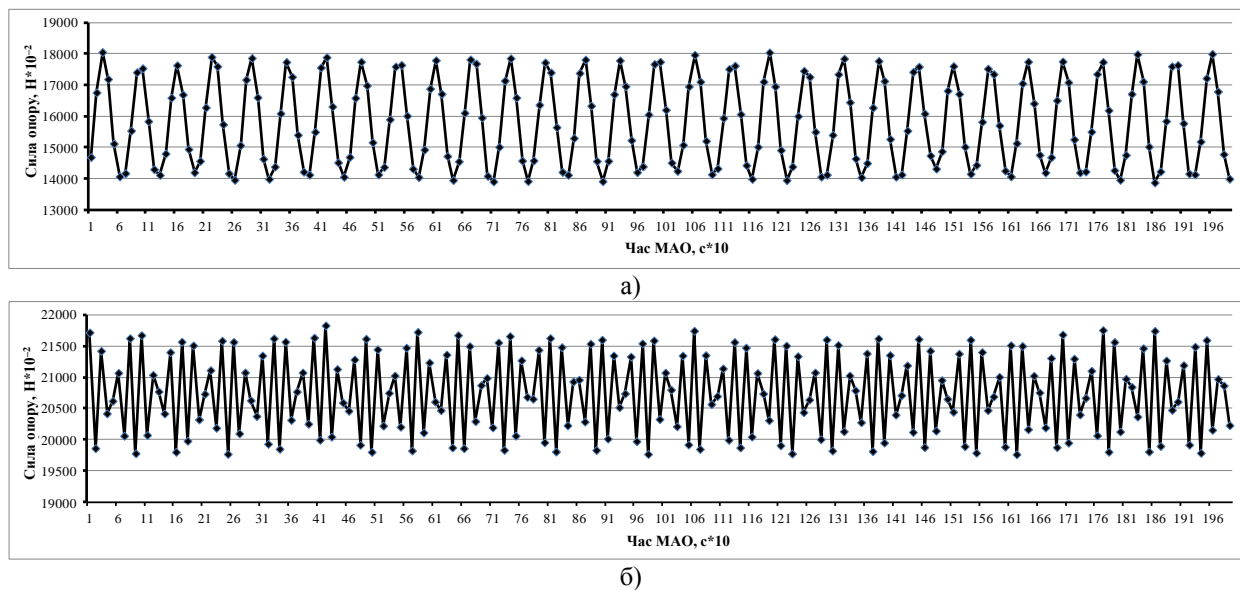


Рис. 4 – Зміна сили опору в залежності від часу MAO зразка з феромагнітної сталі 40X13 при обробленні порошком Полімам-М при швидкості обертання деталей навколо осі кільцевої ванни 1 м/с та магнітній індукції в порожньому зазорі 0,2 Тл – (а) та швидкості обертання 3 м/с та магнітній індукції 0,245 Тл – (б)

Подібна поведінка MAI при підвищених швидкостях MAO може бути пов'язана з особливостями перебудови, зміною розмірів та об'ємів структурних елементів магнітно-абразивного інструменту та умовами їх взаємодії з оброблюваними поверхнями або з наявністю модуляції сигналу, що надходить з датчика і залежить від частоти, з якою здійснюється запис даних. Даний ефект вимагає додаткового, більш ретельного аналізу з метою отримання реальних, більш точних значень.

Було виконано аналіз характеру зміни в циклі оброблення середніх величин амплітудних значень сил опору, що спричиняються MAI при MAO магнітних та немагнітних деталей різними порошками. Зміни амплітудних значень коливань сил опору поблизу їхнього середнього значення, як правило, підпорядковуються загальним закономірностям для різних матеріалів та різних умов MAO. Встановлено, що найбільша амплітуда коливань сил лобового опору руху деталей має місце при малих швидкостях оброблення як пара-, так і феромагнітних зразків при використанні порошків з розміром частинок 400/315 мкм і коливається в діапазоні 45 – 70 Н. У міру збільшення швидкості MAO, як і зменшення розміру частинок MAI зазначені коливання зменшуються в 2 – 2,5 рази до 15 – 20 Н. Така поведінка порошку пояснюється перебудовами структурних елементів MAI, їх руйнуванням, зміною їх розмірів, формуванням ущільнених об'ємів з порошку в зазорі між полюсним наконечником і поверхнею деталі, розривом віялоподібних ущільнень, коливанням груп конусоподібних стовпчиків, які відбуваються при русі деталей в порошковому магнітно-абразивному інструменті. При цьому відбувається зміна реологічних характеристик MAI, здатність окремих частинок провертатися як відносно оброблюваної поверхні, так і відносно суміжних частинок, які формують представницькі об'єми [1].

**Висновки.** Виконані систематичні дослідження з безпосереднього вимірювання сил лобового опору, що спричиняється магнітно-абразивним інструментом оброблюваним циліндричним деталям діаметром 16 мм і висотою 30 мм, виготовлених з пара-, феро- та діамантних матеріалів, в кільцевій камері діаметром 200 мм з робочою висотою 30 мм при швидкостях оброблення в діапазоні 1 – 3 м/с, магнітній індукції в робочих зонах, що змінюється в діапазоні 0,2 – 0,25 Тл. Показано, що сили опору суттєво залежать від магнітних та реологічних властивостей магнітно-абразивного інструменту. При MAO лобовий опір для немагнітних деталей практично однаковий і не залежить від швидкості оброблення, а зі збільшенням магнітної індукції у робочих зонах має місце його лінійне зростання. Коефіцієнт збільшення лобового опору, що визначається магнітним полем, для порошків розміром частинок 400/315 мкм становить 960 Н/Тл, а для розміру 200/100 мкм – 720 Н/Тл. Показано, що сили лобового опору при MAO феромагнітних зразків як і для немагнітних зразків не залежать від швидкості оброблення і змінюються в діапазоні від 160 до 220 Н, це в 1,2-1,45 разів вище, ніж для немагнітних деталей, що пов'язано з дією сил магнітного походження та особливостями взаємодії структурних елементів MAI з оброблюваними поверхнями, формуванням зон заклинювання між поверхнею деталі та полюсними наконечниками кільцевої ванни. Встановлено періодичну зміну сил опору MAI оброблюваній деталі поблизу їх середнього значення, пов'язані з особливостями перебудови, зміною

розмірів та об'ємів структурних елементів магнітно-абразивного інструменту та умовами їх взаємодії з оброблюваними поверхнями.

#### Список літератури:

1. Майборода В. С. Основи створення і використання порошкового магнітно-абразивного інструменту для фінішної обробки фасонних поверхонь: дис. ... докт. техн. наук : 05.03.01 / Майборода Віктор Станіславович. – Київ, 2001. – 404 с.
2. Майборода В. С. Магнітно-абразивная обработка специальных деталей. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Майборода Виктор Станиславович. – Киев, 1988. – 170 с.
3. Джулій Д. Ю. Підвищення якості багатограничних непереточуваних твердосплавних пластин при магнітно-абразивному обробленні в кільцевій ванні: дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / Джулій Дмитро Юрійович. – Київ, 2014. – 175 с.
4. Майборода В. С. Магнітно-абразивна обробка осевого і кінцевого різального інструменту. 5. Дослідження впливу умов базування деталей на зміну геометричних характеристик різальних кромок свердел при магнітно-абразивній обробці / В.С. Майборода, Д. В. Хроновский, В. І. Солодкий, Н. В. Ульяненко / Наукові вісті НТУУ "КПІ" – 2002. – №5. – С.69–73.
5. Гейчук В. М. Синтез кінематики процесу магнітно-абразивної обробки в кільцевій ванні: дис. ... докт. техн. наук : 05.03.01 / Гейчук Володимир Миколайович. – Київ, 2012. – 472 с.
6. Тарган Д.В. Аналіз інтенсивності магнітно-абразивного оброблення митчиків в залежності від кінематичних параметрів процесу / Д. В. Тарган, В. С. Майборода, Д. Ю. Джулій // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. Сучасні технології в машинобудуванні, транспорті та гірництві. – Кременчук: КрНУ, 2017. – №106. – С. 82-88.
7. Майборода В. С. Структурно-фізическая модель формирования магнитно-абразивного инструмента в больших магнитных зазорах кольцевого типа при обработке стержневых изделий / В. С. Майборода, Д. Ю. Джулій, І. В.Ткачук // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. – Донецьк: ДонНТУ, 2013. – Випуск 1(10). – С. 36–46.
8. Гавриш А. П. Перетворювач для вимірювання тиску порошку на оброблювану поверхню при магнітно-абразивній обробці / А. П. Гавриш, О. О. Мельник // Технологія і техніка друкарства. – Київ: НТУУ "КПІ" ВПІ, 2008. – №1(19). – С. 101–105.
9. Сакулевич Ф. Ю. Основы магнитно-абразивной обработки. – Мн.: Наука и техника, 1981. – 328 с.
10. Ткачук І. В. Формування магнітно-абразивного інструменту зі стабільними властивостями в робочих зонах кільцевого типу: дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / Ткачук Іванна Валентинівна. – Київ, 2015. – 164 с.
11. Майборода В. С. Дослідження властивостей магнітно-абразивного інструменту, сформованого з двофракційних сумішей порошків при магнітно-абразивній обробці у великих магнітних щілинах // Технологічні системи. – 2007. – №1(37). – С.40–55.
12. Степанов О. В. Исследование процесса формирования магнитно-абразивного порошкового инструмента для обработки деталей сложной геометрической формы: дис. ... канд. техн. наук : 05.16.06 / Степанов Олег Васильевич. – Киев, 1997. – 145 с.
13. Майборода В. С. Особливості взаємодії магнітно-абразивного інструменту з оброблюваною поверхнею в умовах кільцевої ванни / В. С. Майборода, К. О. Заставський, Р. Б. Жук // Житомир: Технічна інженерія. – 2021. – №2(88). – С.3–13.
14. Олиker В. Е. Порошки для магнитно-абразивной обработки и износостойких покрытий / В. Е. Олиker. – М.:Металлургия, 1990. – 176 с.
15. Майборода В. С., Слободянюк І. В., Джулій Д. Ю. Магнітно-абразивная обработка деталей сложной формы. Житомир: ПП "Рута", 2017. 272 с.

#### References (transliterated)

1. Maiboroda V. S. *Osnovi stvorenniya i vikoristannya poroshkovogo magnitno-abrazivnogo instrumentu dlya finishnoyi obrobki fasonnikh poverkhon* [Fundamentals of creating and using of the powder magneto-abrasive tool for finishing of shaped surfaces]: dis. doc. tech. sciences. – Kyiv. 404 p (2001).
2. Maiboroda V. S. *Magnitno-abrazivnaya obrabotka specialnykh detalej* [Magneto-abrasive machining of special parts]: dis. cand. tech. sciences. – Kyiv. 170 p (1988).
3. Dzhulii D. Yu. *Pidvishhennya yakosti bagatogrannikh neperetochuvanikh tverdosplavnikh plastin pri magnitno-abrazivnomu obroblenni v kilczevij vannii* [Increasing quality of multisided not sharpened hard-alloy plates by using magneto-abrasive machining in ring-type working area]: dis. cand. tech. sciences. – Kyiv. 175 p (2014).
4. Maiboroda V. S., Khronovskij D. V., Solodkij V. I., Ulyanenko N.V. *Magnitno-abrazivna obrobka osovogo i kinczevogo rizalnogo instrumentu. 5. Doslidzhennya vplivu umov bazuwannya detalej na zminu geometrichnikh kharakteristik rizalnikh kromok sverdel pri magnitno-abrazivnij obrobcci* [Magneto-abrasive machining of axial and end cutting tools. 5. Research of influence of conditions of basing of parts on change of geometrical characteristics of cutting edges of drills at magneto-abrasive machining] / *Naukovi visti NTUU "KPI"* [Scientific news of NTUU "KPI"]. Kyiv. №5. 69–73 (2022).
5. Gejchuk V. M. *Sintez kinematiki procesu magnitno-abrazivnoyi obrobki v kilczevij vannii* [Synthesis of kinematics of the process of magneto-abrasive machining in the ring bath]: dis. doc. tech. sciences. – Kyiv. 472 p (2012).
6. Targan D. V., Maiboroda V. S., Dzhulii D. Yu. *Analiz intensivnosti magnitno-abrazivnogo obroblyennya mitchikov v zalezhnosti vid kinematichnikh parametriv procesu* [Analysis of the intensity of magnetic-abrasive treatment of taps depending on the kinematic parameters of the process] / *Visnik KrNU imeni Mikhajla Ostrogradskogo. Suchasni tehnologiyi v mashinobuduvanni, transporti ta gimnicztvi* [Bulletin of the Mykhailo Ostrohradsky KrNU. Modern technologies in mechanical engineering, transport and mining]. Kremenchuk: KrNU. №106. 82-88 (2017).
7. Maiboroda V. S., Dzhulii D Yu., Tkachuk I. V. *Strukturno-fizicheskaya model formirovaniya magnitno-abrazivnogo instrumenta v bolshikh magnitnykh zazorakh kolczevogo tipa pri obrabotke sterzhnevyykh izdelij* [Structural and physical model of formation of magneto-abrasive tool in large magnetic gaps of ring type during machining of axial parts] / *Naukovi praczi Doneczkogo naczional'nogo tekhnichnogo universitetu. Seriya: Mashinobuduvannya i mashinoznavstvo* [Scientific works of Donetsk National Technical University. Series: Mechanical Engineering and Mechanical Science]. Donetsk: DonNTU. Issue 1 (10). 36–46 (2013).
8. Gavriash A. P., Melnik O.O. *Peretvoryuvach dlya vimiryuvannya tisku poroshku na obroblyuvanu poverkhnyu pri magnitno-abrazivnij obrobcci* [Converter for measuring the pressure of powder on the machined surface during magneto-abrasive machining] / *Tekhnologiya i tekhnika drakarstva* [Technology and technique of printing]. Kyiv: NTUU "KPI" VPI. №1 (19). 101–105 (2008).
9. Sakulevich F. Yu. *Osnovy magnitno-abrazivnoj obrabotki* [Fundamentals of magneto-abrasive machining]. – Minsk: Science and technology. 328 p (1981).
10. Tkachuk I. V. *Formuvannya magnitno-abrazivnogo instrumentu zi stabilnimi vlastivostyami v robochikh zonakh kilczevogo tipu* [Formation of the magneto-abrasive tool with stable properties in working zones of ring type]: dis. cand. tech. sciences. – Kyiv. 164 p (2015).
11. Maiboroda V. S. *Doslidzhennya vlastivostej magnitno-abrazivnogo instrumentu, sformovanogo z dvokhfrazkczijnikh sumishej poroshkiv pri magnitno-*

- abrazivnij obrobcezi u velikikh magnitnikh shhilinakh* [Investigation of properties of magneto-abrasive tool formed from two-fractional mixtures of powders during magneto-abrasive machining in large magnetic gaps] / *Tekhnologichni sistemi* [Technological systems]. №1 (37). 40–55 (2007).
12. Stepanov O. V. *Issledovanie processa formirovaniya magnitno-abrazivnogo poroshkovogo instrumenta dlya obrabotki detalej slozhnoy geometricheskoy formy* [Investigation of the process of formation of a magneto-abrasive powder tool for machining parts with complex geometric shapes]: dis. cand. tech. sciences. – Kyiv. 145 p (1997).
  13. Maiboroda V. S., Zastavskiy K. O., Zhuk R. B. *Osoblivosti vzayemodiyi magnitno-abrazivnogo instrumentu z obroblyuvanoyu poverkhneyu v umovakh kilczevoyi vanni* [Features of interaction of the magneto-abrasive tool with the machined surface in the conditions of a ring bath] / *Zhytomyr: Technical engineering*. №. 2 (88). 3–13 (2021).
  14. Olikar V. E. *Poroshki dlya magnitno-abrazivnoy obrabotki i iznosostojkikh pokritij* [Powders for magneto-abrasive machining and wear-resistant coatings]. – Moskva, Metallurgy. 176 p (1990).
  15. Maiboroda V. S., Slobodianiuk I. V., Dzhulii D. Yu. *Magnitno-abrazivnaya obrabotka detalej slozhnoy formy* [Magneto-abrasive machining of parts of complex shape]: monografiya. – Zhytomyr: PP "Ruta". 272 p (2017).

Поступила (received) 24.03.2022

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Майборода Віктор Станіславович (Maiboroda Viktor Stanislavovich)** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри конструювання машин Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6902-6928>; e-mail: [maiborodavs@gmail.com](mailto:maiborodavs@gmail.com).

**Джулій Дмитро Юрійович (Dzhulii Dmytro Yuriyovich)** – кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання машин Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8863-626X>; e-mail: [dmytro.dzhulii@gmail.com](mailto:dmytro.dzhulii@gmail.com).

**Бесарабець Юрій Йосипович (Besarabets Yuriy Josipovich)** – кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання машин Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0773-099X>; e-mail: [york\\_bessar@ukr.net](mailto:york_bessar@ukr.net).

**Слободянюк Іванна Валентинівна (Slobodianiuk Ivanna Valentynivna)** – кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання машин Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0226-2691>; e-mail: [ivannavalentinovna@gmail.com](mailto:ivannavalentinovna@gmail.com).

**Заставський Костянтин Олегович (Zastavskiy Konstantyn Olegovich)** – аспірант кафедри конструювання машин Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", м. Київ, Україна; e-mail: [zastavskiy96@gmail.com](mailto:zastavskiy96@gmail.com).