

# РОЗДІЛ І. ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА, МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ТА МАШИНОБУДУВАННЯ

DOI: 10.25140/2411-5363-2024-2(36)-9-14

УДК 621.923

**Віктор Станіславович Майборода<sup>1</sup>, Дмитро Юрійович Джулій<sup>2</sup>,  
Костянтин Олегович Заставський<sup>3</sup>, Юрій Степанович Налімов<sup>4</sup>**

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

<sup>2</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання машин  
Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" (Київ, Україна)  
E-mail: [dmytro.dzhulii@gmail.com](mailto:dmytro.dzhulii@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8863-626X>. SCOPUS Author ID: 57217587956

<sup>3</sup>аспірант кафедри конструювання машин  
Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" (Київ, Україна)  
E-mail: [zastavskiy96@gmail.com](mailto:zastavskiy96@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3372-369X>

<sup>4</sup>кандидат технічних, старший науковий співробітник  
Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка (Київ, Україна)  
E-mail: [Nalimov@nas.gov.ua](mailto:Nalimov@nas.gov.ua)

## ДОСЛІДЖЕННЯ СИЛ ОПОРУ З БОКУ МАГНІТНО-АБРАЗИВНОГО ІНСТРУМЕНТУ ПРИ ОБРОБЛЕННІ ТОНКИХ ДЕТАЛЕЙ ТИПУ ЛОПАТКА ГТД

У проведеній роботі досліджено сили лобового опору, що виникають під час магнітно-абразивного оброблення тонких лопаток газотурбінного двигуна. Досліджено вплив технологічних параметрів процесу, зокрема швидкості руху лопаток вздовж робочої зони та величини магнітної індукції, на сили опору з боку магнітно-абразивного інструменту на оброблювані поверхні. Встановлено, що зростання швидкості сприяє зниженню відсоткової різниці між максимальними та мінімальними значеннями сил опору, а при малих міделевих перетинах деталей призводить також до руйнування і «зриву» веретеноподібних формувань у магнітно-абразивному інструменті.

**Ключові слова:** магнітно-абразивне оброблення; швидкість оброблення; магнітна індукція; сили опору; міделевий перетин.

Рис.: 3. Бібл.: 7.

**Актуальність теми дослідження.** Магнітно-абразивний інструмент (МАІ) – це інструмент, що формується з магнітно-абразивного порошку в процесі магнітно-абразивного оброблення (МАО) [1], а його властивості залежать від низки факторів різного походження (типу та розміру частинок магнітно-абразивного порошку, величини магнітної індукції, конструкції магнітної системи, кінематики та динаміки процесу і т. ін.). Процес МАО у великих магнітних зазорах здебільшого застосовується при фінішному обробленні виробів складної форми, таких як різальний інструмент, лопатки газотурбінних двигунів (ГТД) і т. ін. Багатофакторність умов формування МАІ у великих магнітних зазорах створює певні ускладнення при дослідженнях його властивостей, а відсутність відповідної інформації є перешкодою для ефективного використання методу у виробничих умовах унаслідок недостатності інформації про реальні сили, процеси та явища, що мають місце під час оброблення. Це безпосередньо впливає на можливість формування ефективного МАІ та є критичною проблемою у розрахунку верстатів для проведення оброблення через неможливість коректної постановки технічного завдання.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У роботах [1; 2] показано, що ефективне МАО лопаток ГТД на верстаті з кільцевою робочою зоною з великими магнітними зазорами та, як наслідок, опір руху деталі з боку МАІ безпосередньо залежить від швидкості оброблення. Встановлено, що при малих швидкостях оброблення перед оброблюваною лопаткою рухається маса порошку у вигляді квазістабільних веретеноподібних формувань, тобто часточки порошку утворюють ущільнений, малорухомий об'єм із порошку, який

практично не рухається відносно оброблюваних поверхонь, особливо в зоні атакуючої кромки, що зумовлює мінімальне видалення матеріалу деталі з кромки й поверхонь лопатки біля кромки. При цьому ущільнена зона в МАІ перешкоджає руху деталі в робочому зазорі, тобто відбувається збільшення сил опору. Натомість оброблення при високих швидкостях характеризується розривом веретеноподібних формувань перед деталлю та, як наслідок, активною взаємодією частинок МАІ з усіма оброблюваними поверхнями [1-3]. Саме зазначене явище дозволило розробити технологічні засади для розмірного формування вхідних і вихідних кромки лопаток компресорів ГТД. Проте отримані попередні результати суперечать даним отриманим у дослідженнях, наведених у [4; 5]. Тому доцільним є проведення детальнішого аналізу впливу швидкості оброблення на силу опору при МАО з використанням як зразку лопатки компресора газотурбінного двигуна.

**Метою роботи** є дослідження сил лобового опору, який виникає в процесі МАО при взаємодії магнітно-абразивного інструменту з лопаткою ГТД залежно від технологічних параметрів процесу.

Для визначення нормальних сил при МАО тонкої деталі було використано методику дослідження нормальної складової сил, що діють на деталь з боку МАІ наведену в [5]. Зразками, що використовували в експерименті були лопатки компресора ГТД товщиною 1 мм, висотою 35 мм. Зразки виготовлені зі сплаву титана ВТ-8. Швидкість руху лопаток в робочій зоні варіювалась в діапазоні 1–3,5 м/с, а індукція магнітного поля в межах 0,2–0,25 Тл.

На рис. 1 наведено гістограми залежності сил опору з боку МАІ від величини швидкості та магнітної індукції при обробленні тонкої деталі.

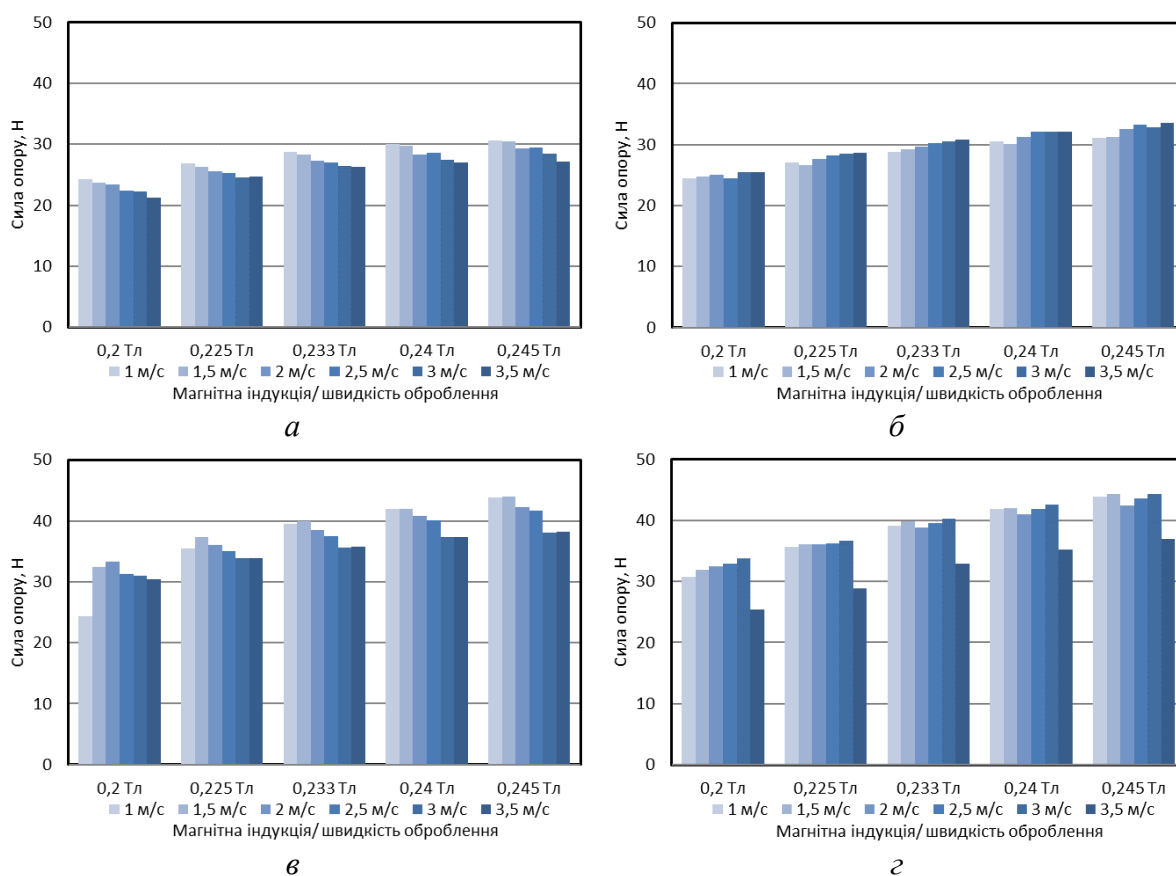


Рис. 1. Залежність значень сил опору з боку МАІ від величини магнітної індукції та швидкості оброблення при МАО лопатки ГТД порошками Полімам-Т 200/100 мкм (а), 400/315 мкм (в) та Полімам-М 200/100 мкм (б), 400/315 мкм (г)

Визначено, що оброблення тонкої деталі порошками з зернистістю 200/100 мкм (рис. 1, *a, б*) не має явного впливу швидкості оброблення на сили опору, вплив величини магнітної індукції залишається суттєвим, хоч і меншим ніж при обробленні циліндричних і призматичних деталей з характерними розмірами 8-16 мм [6]. Встановлено, що значення сили опору при MAO тонкої деталі суттєво менші ніж при обробленні більших деталей [6; 7], що пояснюється виходячи з величини міделевого перетину досліджуваних деталей. Зазначимо, що при обробленні лопаток ГТД порошками з зернистістю 400/315 мкм (рис. 1, *в, г*) має місце зміна умов взаємодії MAI з оброблюваними поверхнями, особливо при підвищених швидкостях руху деталей вздовж кільцевої ванни і, як наслідок, інший характер процесу оброблення. Визначено, що при швидкостях оброблення 3–3,5 м/с присутнє різке зниження сил опору (на 10–25 %). Це підтверджує явища, описані в роботах [1-3], пов'язані з умовами утворення і руйнування веретеноподібних структурних елементів в складі MAI, які безпосередньо контактують з оброблюваною лопаткою.

Для кращого пояснення явища розриву веретеноподібних утворень в MAI необхідно розглянути поведінку порошку в зоні перед деталлю. Схематично поведінка частинок магнітно-абразивного порошку (МАП) показана на рис. 2. Дрібні зерна МАП фракції 200/100 мкм при невеликих швидкостях переміщення деталей (до 3 м/с) через суттєву різницю в розмірах частинок і представницьких об'ємів, які формуються в MAI утворюють перед вхідною кромкою лопатки ущільнену квазістабільну зону (рис. 2, *a*). Ущільнена зона, затримуючись на вхідній кромці, рухається в MAI разом з лопаткою і перешкоджає вільному обтіканню поверхні оброблюваної деталі. Відзначимо, що додатково в ущільненій зоні має місце збільшення магнітних сил, що з'єднують часточки порошку між собою. У результаті руху лопатки разом з зазначеною зоною має місце зростання сил опору з боку MAI внаслідок зростання величини міделевого перетину, який визначається розмірами ущільненої зони. Такі ущільнені зони запобігають розриву веретеноподібних формувань порошку, границі яких показані штриховими лініями, та утримують стабільно високі значення сили опору. Натомість частки порошку зернистістю 400/315 мкм (рис. 2, *б*) не схильні до затримки значної маси порошку на торці оброблюваної деталі, через відносно великий розмір зерен у порівнянні з вхідною кромкою деталі. Такий характер розміщення зерен сприяє явищу розриву веретеноподібних утворень порошку при високих швидкостях оброблення, та, як наслідок, сприяє різкому падінню сил опору зі сторони MAI. Це фактично підтверджує, наведений у роботах [1-3], ефект руйнування веретеноподібних утворень з порошку, які формуються в середній частині зазору перед деталлю при високих швидкостях оброблення. Варто також зазначити, що найбільш активно це явище спостерігається при MAO з використанням порошку Полімам-М (рис. 1, *г*). Це може бути пов'язано з округлою формою зерен такого порошку, що зумовлює менші сили заклинювання між часточками порошку у порівнянні зі скалчастим, що своєю чергою сприяє активному руйнуванню веретеноподібних ущільнених утворень у структурі MAI, зриву частинок порошку з лобової поверхні – кромки лопатки шляхом роз'єднання частинок і структурних утворень в порошок між собою.

Проаналізована різниця між мінімальними та максимальними значеннями величин сили опору зафіксованих обладнанням протягом певного часу MAO. Визначено (рис. 3), що коливання між максимальними та мінімальними значеннями сил лобового опору суттєво знижуються зі зростанням швидкості оброблення, тобто відбувається стабілізація процесу MAO – має місце рівномірне «обтікання» формуваннями MAI оброблюваної поверхні. Відсоткове значення в різниці максимальних та мінімальних значень відносно середнього значення сили опору при малих швидкостях оброблення сягало 45 %, при високих – не більше 10 %.



Рис. 2. Схематичне представлення взаємодії веретеноподібних формувань у МАІ сформованого з дрібнозернистих (а) та крупнозернистих (б) порошків при МАО тонкої деталі типу лопатка компресора ГТД

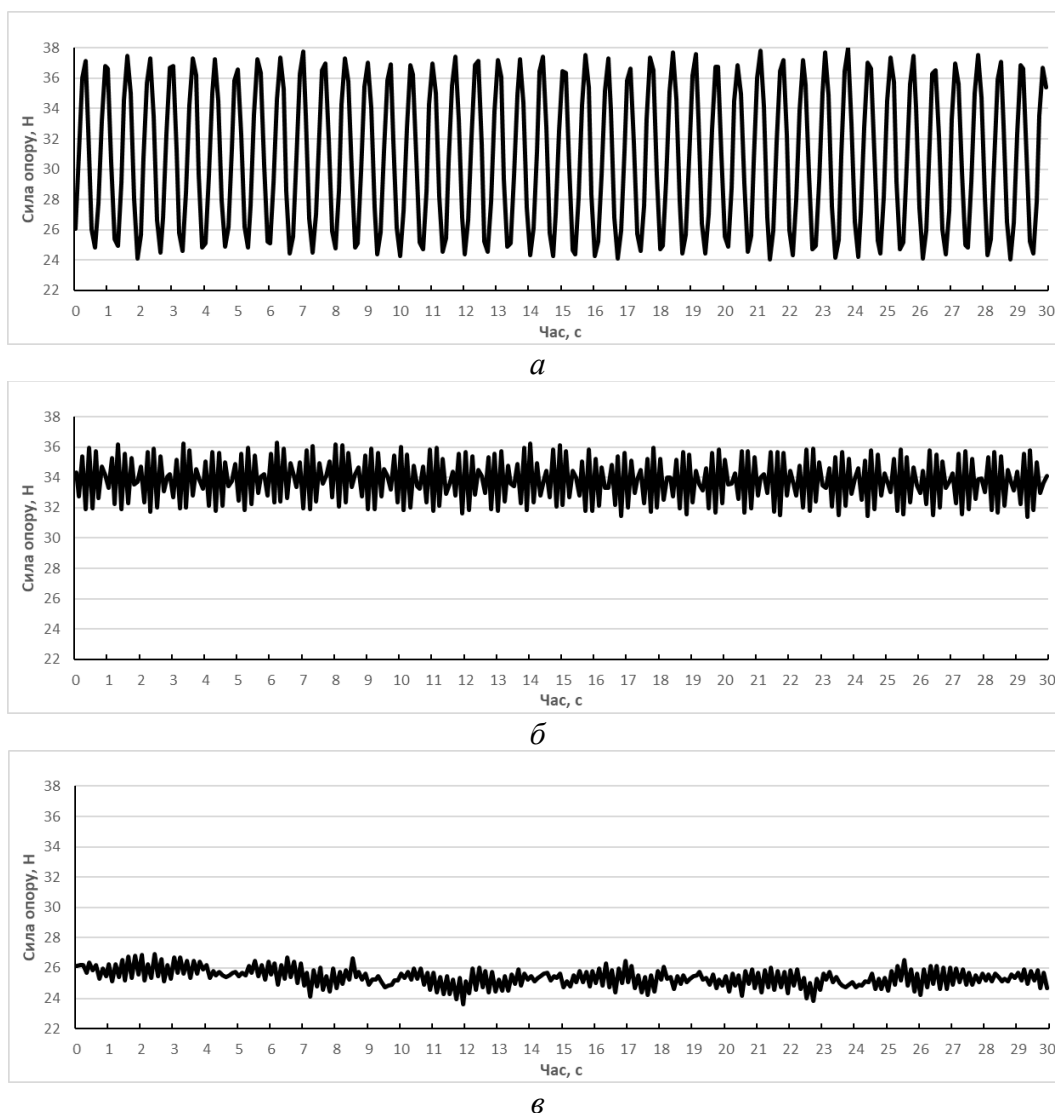


Рис. 3. Зміна величини сил лобового опору у процесі МАО при обробленні тонкої деталі порошком Полімам-М 400/315 мкм зі швидкістю: а – 1 м/с; б – 3 м/с; в – 3,5 м/с

Встановлено, що тенденції в зміні різниці мінімальних та максимальних значень не змінні при будь-яких умовах оброблення та будь-яких розмірах оброблюваної деталі [6]. Різниця мінімальних та максимальних значень спадає при збільшенні швидкості руху деталі в робочій зоні. Це може бути пов'язане зі специфічними властивостями середовища МАІ, типу Бінгамовського середовища (поведінка твердого тіла до точки зсуву та рідкого після), а також переходу умов «течії порошкового середовища» з турбулентного в ламінарний зі збільшенням швидкості руху [1].

**Висновки.** Виконані дослідження підтвердили наведені у попередніх роботах [1; 2] особливості поведінки МАІ при обробленні тонких деталей, а саме розрив веретеноподібних утворень на високих швидкостях оброблення і його прямий вплив на ефективність оброблення та особливостей в зміні умов взаємодії деталі зі структурними квазістабільними утвореннями в МАІ. Визначено, що вплив швидкості оброблення на силу опору руху деталі з боку МАІ, присутній при відносно високих швидкостях оброблення та відносно малих розмірах міделевого перетину деталі. Зазначене явище "зриву" і руйнування веретеноподібних формувань в МАІ при МАО тонких лопаток компресорів ГТД є підґрунтям для ефективного формування радіусів округлення кромки лопаток на фінішних етапах їх виготовлення. Подальші дослідження доцільно пов'язати з впливом розміру та форми частинок порошку на силу опору МАІ руху зразків.

### Список використаних джерел

1. Майборода, В. С. Основи створення і використання порошкового магнітно-абразивного інструменту для фінішної обробки фасонних поверхонь: дис. ... д-ра техн. наук : 05.03.01 / Майборода Віктор Станіславович. – Київ, 2001. – 404 с.
2. Степанов, О. В. Дослідження процесу формування магнітно-абразивного порошкового інструменту для обробки деталей складної геометричної форми: дис. ... канд. техн. наук : 05.16.06 / Степанов Олег Васильович. – Київ, 1997. – 145 с.
3. Майборода, В. С. Магнитно-абразивная обработка деталей сложной формы / В. С. Майборода, И. В. Слободянюк, Д. Ю. Джулий. – Житомир : ПП «Рута», 2017. – 272 с.
4. Майборода, В. С. Особливості взаємодії магнітно-абразивного інструменту з оброблюваною поверхнею в умовах кільцевої ванни / В. С. Майборода, К. О. Заставський, Р. Б. Жук // Технічна інженерія. – 2021. – № 2 (88). – С. 3–13.
5. Майборода, В. С. Дослідження сил лобового опору, що виникають в магнітно-абразивному інструменті при обробленні циліндричних деталей в кільцевій ванні / В. С. Майборода, Д. Ю. Джулій, Ю. Й. Бесарабєц, І. В. Слободянюк, К. О. Заставський // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Технології в машинобудуванні. – 2022. – № 2 (6). – С. 16-22.
6. Майборода, В. С. Дослідження сил опору з боку порошкового середовища на рух деталей при магнітно-абразивному обробленні в кільцевій ванні / В. С. Майборода, Д. Ю. Джулій, К. О. Заставський // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Технології в машинобудуванні. – 2023. – № 2 (8). – С. 134-139.
7. Заставський, К. Вплив розміру деталей на сили лобового опору при магнітно-абразивному обробленні / К. О. Заставський, В. С. Майборода // Mechanics and Advanced Technologies. – 2022. – № 2. – С. 168-177.

### References

1. Maiboroda, V.S. (2001). *Osnovy stvorenniya i vykorystannya poroshkovoho mahnitno-abrazivnogo instrumentu dlya finishnoyi obrobky fasonnykh poverkhon* [Basics of creating and using a powder magnetic abrasive tool for finishing shaped surfaces] [Doctor's thesis; National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"].
2. Stepaniv, O.V. (1997). *Doslidzhennia protsesu formuvannia mahnitno-abrazivnogo poroshkovoho instrumentu dlia obrobky detalei skladnoi heometrychnoi formy* [Study of the process of forming a magnetic-abrasive powder tool for processing parts of a complex geometric shape] [Candidate dissertation; National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"].
3. Maiboroda, V.S., Slobodianiuk, I.V., Dzhulii, D.Yu. (2017). *Magnitno-abrazivnaya obrabotka detaley slozhnoy formy* [Magneto-abrasive finishing of complex shaped parts]. PP "Ruta".
4. Maiboroda, V.S., Zastavskiy, K.O., Zhuk, R.B. (2021). *Osoblyvosti vzaiemodii mahnitno-abrazivnogo instrumentu z obrobliuvanoi poverkhneiu v umovakh kiltsevoi vanny* [Characteristics

of the interaction between magnetic-abrasive tool and a processed surface in a circular work zone]. *Tekhnichna inzheneriia – Technical Engineering*, 2(88), 3–13.

5. Maiboroda, V.S., Dzhulii, D.Yu., Besarabets, Yu. Jo., Slobodianiuk, I.V., Zastavskiy, K.O. (2022). Doslidzhennia syl lobovoho oporu, shcho vynykaiut v mahnitno-abrazivnomu instrumenti pry obroblenni tsylindrychnykh detalei v kiltsevii vannii [Investigation of the drag forces arising in the magneto-abrasive tool during the finishing of cylindrical parts in the annular bath]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "KhPI". Seriya: Tekhnologii v mashynobuduvanni – Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry*, 2, 16–22.

6. Maiboroda, V.S., Dzhulii, D.Yu., Zastavskiy, K.O. (2023). Doslidzhennia syl oporu z boku poroshkovoho seredovyscha na rukh detalei pry mahnitno-abrazivnomu obroblenni v kiltsevii vannii [Investigation of the drag forces from the side of the powder environment on the parts movement during the magneto-abrasive finishing in the annular bath]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "KhPI". Seriya: Tekhnologii v mashynobuduvanni – Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry*, 2(8), 134–139.

7. Zastavskiy, K.O., Maiboroda, V.S. (2022). Vplyv rozmiru detalei na syly lobovoho oporu pry mahnitno-abrazivnomu obroblenni [The influence of the size of details on the frontal resistance forces during magnetic abrasive finishing]. *Mechanics and Advanced Technologies*, 6(2), 168–177.

Отримано 10.04.2024

UDC 621.923

**Victor Maiboroda<sup>1</sup>, Dmytro Dzhulii<sup>2</sup>, Kostiantyn Zastavskiy<sup>3</sup>, Yurii Nalimov<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Doctor 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](mailto:maiborodavs@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6902-6928> SCOPUS Author ID: [7004207035](https://orcid.org/0000-0001-6902-6928)

<sup>2</sup>PhD in Technical Sciences, Associate professor of the Department of machine design

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

E-mail: [dmytro.dzhulii@gmail.com](mailto:dmytro.dzhulii@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8863-626X>. SCOPUS Author ID: [57217587956](https://orcid.org/0000-0002-8863-626X)

<sup>3</sup>PhD Student of the Department of machine design

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

E-mail: [zastavskiy96@gmail.com](mailto:zastavskiy96@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3372-369X>

<sup>4</sup>PhD in Technical Sciences, Senior Scientist of the Department of Fatigue and Crack Resistance of Structural Materials  
G.S. Pysarenko Institute for Problems of Strength (Kyiv, Ukraine)

E-mail: [Nalimov@nas.gov.ua](mailto:Nalimov@nas.gov.ua)

## RESEARCH OF DRAG FORCES ON THE PART OF THE MAGNETO-ABRASIVE TOOL DURING THE FINISHING OF THIN PARTS SUCH AS THE BLADE OF A GAS TURBINE ENGINE

*At low speeds of magneto-abrasive finishing of gas turbine engine blades on the machine with an annular working zone with a large magnetic gap in front of the surface being finished, the slow-moving volume of powder is formed. On the other hand, at the high speed of part movement in the working zone, the spindle-like formations break in front of the part, which causes a more active interaction of the magneto-abrasive tool with the finished surfaces. However, the previously obtained results are somewhat contradictory and require a more detailed study of the effect of the machining speed on the drag force at finishing parts of this type.*

*The aim of the work is the study of the drag forces, that arise in the process of magneto-abrasive finishing during the interaction of the magneto-abrasive tool with the gas turbine engine blade, depending on the technological parameters of the process.*

*For experimental determination of the normal drag forces during machining a thin part with a thickness of 1 mm and a height of 35 mm, was machined at a speed of movement in the working area, which varied from 1 to 3 m/s with an induction of 0.2 to 0.25 T. The behavior of the powder in the area in front of the moving part during machining by different powders and the difference between the maximum and minimum values of the drag force were analyzed.*

*The obtained results confirmed the previous studies of the behavior of the magneto-abrasive tool during the machining of thin parts, namely, the breaking of spindle-like formations at high machining speeds and its direct effect on the efficiency of finishing and the peculiarities of changing the conditions of the interaction of the part with the structural quasi-stable formations of the magneto-abrasive tool. It was determined that the influence of the machining speed on the drag force to the part movement by the magneto-abrasive tool occurs at relatively high machining speeds and relatively small dimensions of the middle cross-section of the part. The specified phenomenon of "breakdown" and destruction of the spindle-like formations of the magneto-abrasive tool during the machining of thin blades of gas turbine engine compressors is the basis for the effective formation of the radiuses of edges rounding of the blades on the final stages of their manufacturing.*

**Keywords:** magneto-abrasive finishing, machining speed, magnetic induction, drag forces, middle cross-section.

Fig.: 3. References: 7.