

*Мигзович Артур Володимирович (Artur Myhovych)* – аспірант кафедри технології машинобудування НТУУ КПІ ім. Ігоря Сікорського, E-mail: arthurmygovych@gmail.com, тел.: +38 (095)-126-91-55 ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8687-6879>

УДК 621.923

DOI: 10.20998/2079-004X.2024.1(9).9

**ГАСАНОВ М.І., РУДНЕВ А.В., КОТЛЯР О.В., ТИТАРЕНКО О.В., КОРЧАГИН І.Г.**

## **ОЦІНКА ЗМАЩУВАЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ ТВЕРДИХ ЗМАЩУВАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ АЛМАЗНОМУ ШЛІФУВАННІ ВАЖКООБРОБЛЮВАНИХ МАТЕРІАЛІВ**

Проаналізовано результати досліджень сил різання при алмазному шліфуванні матеріалів, що використовуються при виготовленні та ремонті авіаційної техніки: титанового сплаву ВК6 та жароміцної дисперсійно-твердіючої високолегованої нержавіючої сталі 10X11H23T3MP. Шліфування проводилося з використанням твердих змащувальних матеріалів, що були розроблені авторами. Отримані результати дозволяють стверджувати, що тверді змащувальні матеріали здатні ефективно зменшувати роботу тертя. Стеаринову кислоту слід вважати основою для створення ТЗМ з подальшим удосконаленням їх складу.

**Ключові слова:** алмазне шліфування, тверді змащувальні матеріали, важкооброблювані матеріали, титановий сплав, жароміцна дисперсійно-твердіюча високолегована нержавіюча сталь.

**HASANOV M.I., RUDNEV A.V., KOTLYAR O.V., TYTARENKO O.V., KORCHAGIN I.G.**

### **ASSESSMENT OF THE LUBRICATING CAPACITY OF SOLID LUBRICATING MATERIALS IN DIAMOND GRINDING OF HEAVY-PROCESSED MATERIALS**

The results of research on cutting forces during diamond grinding of materials used in the manufacture and repair of aircraft equipment: titanium alloy VK6 and heat-resistant dispersion-hardening high-alloy stainless steel 10X11H23T3MP were analyzed. Grinding was carried out using solid lubricating materials developed by the authors. The obtained results allow us to state that solid lubricating materials are able to effectively reduce friction. Stearic acid should be considered the basis for the creation of TZM with further improvement of their composition.

**Keywords:** Key words: diamond grinding, hard lubricating materials, hard-to-machine materials, titanium alloy, heat-resistant dispersion-hardening high-alloy stainless steel.

**Вступ.** Всі передові досягнення військової техніки, зокрема авіаційної, ґрунтуються на широкому використанні конструкційних матеріалів з високою міцністю, жаро- та корозійною стійкістю, високим опором втомі та незмінними фізико-механічними характеристиками у широкому діапазоні температур. Це, в першу чергу, високоміцні титанові сплави та нержавіючі жаростійкі сталі, леговані нікелем (більше 20%). Серед загального переліку відповідальних деталей авіабудування особливо виділяють силові деталі та зварні вузли планерів (силові балки, лонжерони, шпангоути, вузли навіснагрегатів, нервюри, рейки закрилків та передкрилків), силові деталі та вузли шасі (підкоси, коромисла візка, шліц-шарніри, гальмівні важелі) [1]. Унікальні властивості зазначених сплавів роблять їх незамінними для вузлів шасі, лопаток турбін авіадвигуна та деталей вихрової камери згоряння [2].

З технологічної точки зору виготовлення таких складних елементів сучасної техніки є непростим завданням, оскільки матеріали погано виливаються, обробляються тиском, зварюються та піддаються різанню – в цілому відносяться до важкооброблюваних. Забезпечити високу якість поверхні при всій складності форми деталі вдається тільки за умов особливого підходу щодо її формування на всіх етапах виробництва. При цьому на завершальні (фінішні) етапи покладається найбільша відповідальність за створення мікрогеометричного профілю поверхні.

Процеси фінішної абразивної обробки – шліфування – для більшості деталей з важкооброблюваних сплавів стали єдиною можливістю забезпечити точність форми та розмірів, здобути необхідну шорсткість поверхні та фізико-механічні властивості поверхневого шару і гарантувати таким чином високу функціональність, надійність та довговічність деталей. Однак, саме процеси шліфування через значну енергоємність потребують значних витрат на свою реалізацію (20-25% від загальних витрат на виробничий процес [3]), які переважно пов'язані з використанням значної кількості мастильно-охолоджувальних речовин та зменшенням їх шкідливого впливу. Зважаючи на світові тенденції щодо підвищення екологічності виробництва [4] та піклування про природні ресурси, все більш актуальними стають технології мінімального [5] та твердого змащування, використання багат шарових абразивних кругів з зернами різного розміру та форми [6], оптимізація параметрів режиму шліфування з урахуванням стану поверхні шліфувального інструменту [7].

Результати попередніх досліджень [8], переконливо засвідчили ефективність використання твердих змащувальних матеріалів (стеарин технічний, себацинова кислота та їх суміш, суміш стеаринової кислоти та дисульфід молібдену) при алмазному шліфуванні твердого сплаву (ВК6) при швидкості різання до 25 м/с. Найкращі показники якості поверхні порівняно з обробкою без змащування були отримані на зразках жароміцної сталі [9]. Розширення технологічних можливостей шліфування важкооброблюваних матеріалів за рахунок вивчення силових характеристик процесу при використанні твердих змащувальних матеріалів іншого

складу з оцінкою їх змащувальної здатності – важлива задача більш широкого впровадження ТЗМ на найбільш відповідальних фінішних етапах обробки.

### Матеріали дослідження.

Для проведення експериментальних досліджень вибрані стратегічно важливі для авіабудування важкооброблювані матеріали: титановий сплав ВТ22 та жароміцна дисперсійно-твердіюча високолегована нержавіюча сталь 10X11Н23ТЗМР.

Таблиця 1 – Состав титанового сплаву ВТ22.

C	Fe	N	O	Si	Zr	V	Mo	Cr	Al
(Max)									
0,1	1,5	0,05	0,2	0,15	0,3	4–5,5	4–5,5	0,5–2	4,4–5,9

Таблиця 2 – Состав нержавеющей стали 10X11Н23ТЗМР.

C	Al	Si	B	S	P	Cr	Ni	Ti	V	Mo
(Max)										
0,1	0,8	0,6	0,02	0,01	0,025	10–15	21–25	2,6–3,2	4–5,5	1–1,6

Відповідно до класифікації [10] зазначені матеріали є представниками 2-х різних груп матеріалів, шліфування яких викликає труднощі через їх особливі властивості. Так, обробка сплаву ВТ22 ускладнюється високою хімічною активністю, низькою теплопровідністю, поганими антифрикційними властивостями, що обумовлює його налипання на круги, високу температуру у зоні шліфування та погіршення якості поверхні. Схожі проблеми виникають при шліфуванні жароміцних корозійностійких сталей, які підсилюються через їх високу в'язкість та ще більш низьку теплопровідність (12 Вт/м·К проти 22 Вт/м·К у ВТ22).

Площа поверхні шліфування експериментальних зразків із сплаву ВТ22 – 200 мм<sup>2</sup> (прямокутник 10 x 20 мм); із нержавіючої сталі – 255 мм<sup>2</sup> (коло Ø 18 мм).

Механічну обробку здійснювали методом алмазного шліфування (АШ) кругами з бакелітовою зв'язкою: АС4 50/40 100% В2-01 на модернізованому універсально-заточному верстаті мод. ЗД642Е.

Технологічні режими шліфування були вибрані на основі літературних даних [11, 12] та результатів власних попередніх досліджень. Зокрема, швидкість різання складала 25 м/с, подовжня швидкість – 1 м/хв. Шліфування проводили за жорсткою схемою при поперечних подачах 0,005; 0,01; 0,015 мм/дв.хід. Ці режими прийняті як такі, що можуть забезпечувати задовільну якість усіх важкооброблюваних матеріалів при фінішному шліфуванні. Вибір показника поперечної подачі в якості досліджуваного параметру ґрунтувалось на відомих даних [13] про його провідну роль у формуванні контактної температури в зоні шліфування, а, відповідно, й у впливі на якість оброблюваної поверхні і технологічні показники процесу.

Вибір і формування експериментального складу ТЗМ для досліджень проводили з урахуванням аналізу літературного огляду [14]. Зокрема, було взято до уваги, що основним наповнювачем сучасних екологічних ТЗМ є насичені вуглеводи та їх похідні, наприклад, стеаринова кислота. В якості антифрикційних, протизносних модифікаторів ефективно використовувати речовини з гексагональною структурою – графіт, дисульфід молібдену, нітрид бору і т.п. Раціональна концентрація вмісту мінеральних добавок знаходиться зазвичай в межах 20...40 %. Для проведення досліджень була вибрана композиції зі складових, наведених у таблиці 1. ТЗМ використовували у вигляді олівця Ø12 мм. Змащування здійснювали шляхом його дотику впродовж 1...2 с до алмазного круга в робочому режимі через кожні 2 подвійні ходи на 3-му.

Таблиця – Состав експериментальних твердих змащувальних матеріалів

Компоненти	Хімічна формула	Склад, %, в ТЗМ, №					
		1	2	3	4	5	6
Стеаринова кислота	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>16</sub> CO <sub>2</sub> H	-	65	100	90	80	65
Азелаїнова кислота	CO <sub>2</sub> H(CH <sub>2</sub> ) <sub>7</sub> CO <sub>2</sub> H	-					
Дисульфід молібдену	MoS <sub>2</sub>	-	35				
Нітрид бору гексагональний	BN	-				20	35

Дзвінна бронза	Cu – 78...82%	-			10		
	Sn – 18...22%						

Вплив ТЗМ на процеси шліфування оцінювали за тангенціальною складовою сили різання  $R_z$ , яка визначає зусилля на подолання пружної та пластичної деформації оброблюваного матеріалу та зношення абразивних зерен і зв'язки. Вимірювання проводили за жорсткою схемою шліфування за допомогою лабораторного експериментального однокомпонентного динамометра.

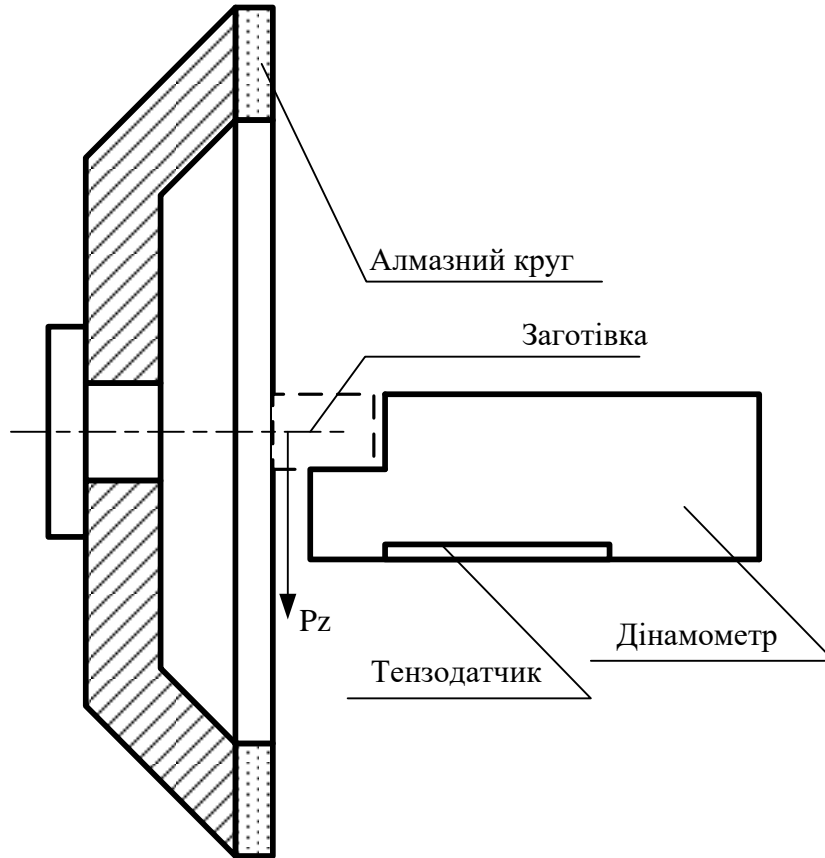


Рис. 1 – Принципова схема експериментальної установки

**Результати.**

Аналіз результатів досліджень, представлених на рис. 2 – 3, дозволяє стверджувати, що в умовах алмазного шліфування, сухого та з використанням ТЗМ, тангенціальна складова сили різання прогнозовано зростає зі збільшенням поперечної подачі [15]. Зазвичай, залежності складових сил різання від поперечної подачі мають нелінійний характер [16] з різним ступенем пропорційності на окремих ділянках досліджувальних значень  $R_z$ .

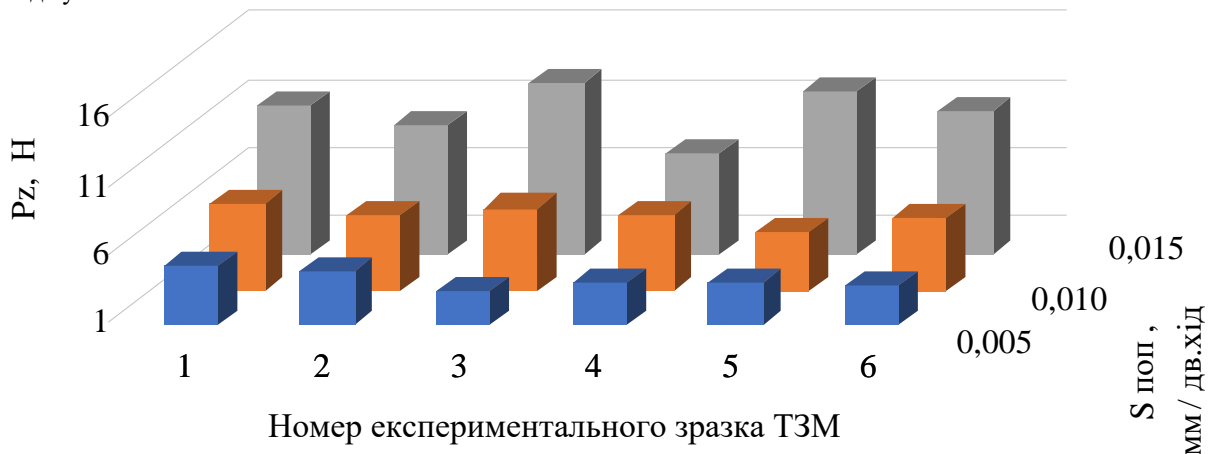


Рис. 2 – Вплив складу твердозмащувальних матеріалів на тангенціальне зусилля алмазного шліфування титанового сплаву BT22

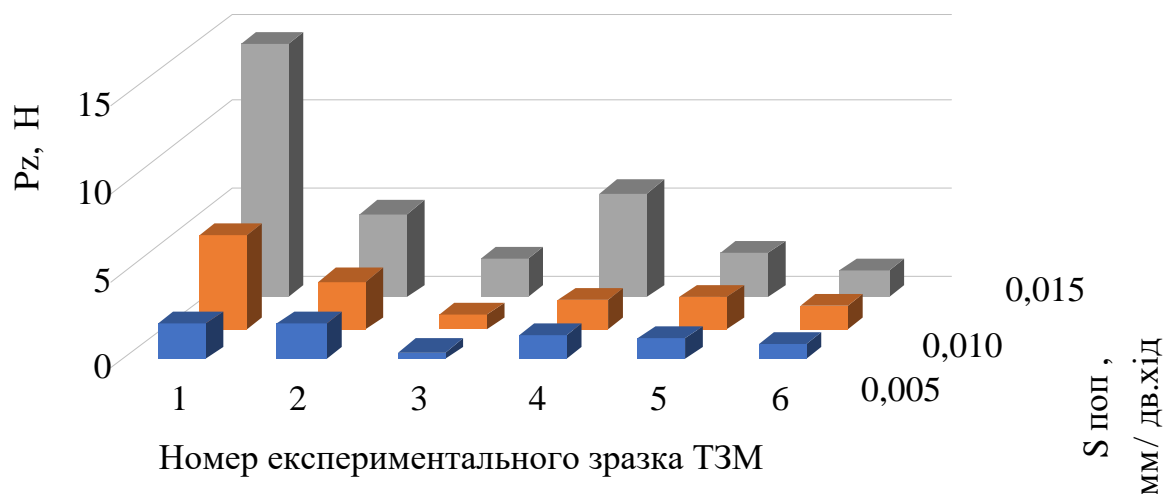


Рис. 3 – Вплив складу твердих мастил на тангенціальну силу алмазного шліфування сталі 10X11H23T3MP

При сухому шліфуванні найменшими значеннями Rz характеризується обробка сталі 10X11H23T3MP (рис. 3) при подачі 0,005 мм/подв.хід. Суттєво більші (в 2 рази) ці значення для сплаву BT22 (рис. 2). Подальше збільшення подачі до 0,01 мм/подв.хід зменшує різницю між матеріалами на 40 %, а при подачі 0,015 мм/подв.хід спостерігається аномально високе значення тангенціальної сили – 14,5 Н на сталі, що в 1,3 рази більше за титановий сплав. Відповідальними за таке збільшення сил є особливі фізико-механічні властивості матеріалів – висока в'язкість, схильність до налипання, адгезійна активність, зокрема, титанового сплаву. Це все призводить до появи так званих «непродуктивних» сил тертя, які для сталі є дуже вагомими. На відміну від продуктивних складових сили різання – зсуву, мікроруйнування та вторинного різання, які пропорційні подачі, непродуктивні сили практично від неї не залежать [17].

Змащування шліфувального круга досліджувальними складами ТЗМ (№№1 – 6) призвело до однозначного зменшення сили Rz при обробці високолегованої сталі практично на всіх режимах обробки титанового сплаву. Це свідчить про ефективність змащувальної дії ТЗМ в цілому, що проявляється у зменшенні сил тертя між поверхнею зразка та шліфувальним кругом.

Найкращий результат по зменшенню сили різання, а відповідно і енергетичних затрат, досягнуто при шліфуванні сталі 10X11H23T3MP практично з усіма використаними ТЗМ. Навіть якщо виключити режим з подачею 0,015 мм/подв. хід, де значення вихідної, «сухої» сили Rz складало аномально високе значення, на менших подачах (0,005 і 0,010 мм/подв. хід) покращення було суттєвим – в залежності від режиму обробки і складу ТЗМ в загальному випадку значення сили Rz падало в 1,6...6,6 разів. Пріоритетність ефективності дії ТЗМ залежала від подачі. Так, при подачах 0,005 і 0,010 мм/подв. хід кращий результат забезпечив ТЗМ №3 (СтК 100%), а при подачі 0,015 мм/подв. хід – ТЗМ №6 (СтК 65% +BN 35%).

Ефективність дії ТЗМ при шліфуванні сплаву BT22 була порівняно нижча, а при використанні ТЗМ №3, 5 і 6 проявлялась тільки на подачах 0,005 і 0,010 мм/подв. хід, що частково підтверджує тезу дослідників [17] про перевагу ролі сил тертя саме за малих подач. В цілому діапазон коефіцієнтів зменшення Rz при обробці BT22 в залежності від режиму і складу ТЗМ складав 1,1...1,7. Максимальне значення забезпечив ТЗМ №3 (СтК 100%), мінімальне – ТЗМ №2 (СтК 65% + MoS<sub>2</sub> 35%).

Порівняння результатів досліджень сил різання і значень постконтактної температури [17] показує, що між ними існує якісна кореляція – більшому значенню  $T_{п}$  відповідає більше значення Rz при обробці одного й того ж матеріалу з ТЗМ і без нього. Це дає можливість попередньої оцінки впливу змащування на силові характеристики процесу шліфування з використанням показника постконтактної температури.

### Висновки.

Новітні способи підвищення екологічності фінішних процесів обробки важкооброблюваних матеріалів фокусуються на зменшенні використання шкідливих речовин та водних ресурсів. Представлене експериментальне дослідження присвячено розгляду альтернативного способу змащування за рахунок використання композиції із твердих речовин.

На основі результатів експериментальних даних алмазного шліфування титанового сплаву BT22 та жароміцної нержавіючої сталі 10X11H23T3MP отримані наступні висновки:

1. Ефективність твердих змащувальних матеріалів, що мають забезпечити кращі умови шліфування, доцільно оцінювати за тангенціальною складовою сили різання, яка в цілому характеризує роботу тертя.
2. Використання ТЗМ найбільш ефективно при обробці жароміцної нержавіючої сталі 10X11H23ТЗМР, особливо в діапазоні подач 0,005 – 0,01 мм/подв.хід. при використанні ТЗМ №3 на основі стеаринової кислоти. Відповідні значення тангенціальної складової складають 0,45 – 0,8 Н. Стабільно хорошу змащувальну здатність у всьому діапазоні подач показав ТЗМ №6 (СтК 65% +BN 35%).
3. Змащувальна здатність досліджених складів ТЗМ при обробці титанового сплаву ВТ 22 дещо гірша порівняно зі сталлю 10X11H23ТЗМР, однак, при подачах до 0,01 мм/подв.хід вони теж здатні ефективно зменшувати роботу тертя. Найкращі результати отримані при використанні ТЗМ №3 на основі стеаринової кислоти – 2,5...6,0 Н. Шліфування зі збільшеними подачами (0,015 мм/подв.хід) доцільно здійснювати з ТЗМ №4 (СтК90% +Бр10%).
4. Всі п'ять з досліджених складів ТЗМ здатні ефективно покращувати умови шліфування важкооброблюваних матеріалів, особливо в діапазоні невеликих подач. Стеаринову кислоту слід вважати основою для створення ТЗМ з подальшим удосконаленнями складу. Наступні дослідження мають на меті оцінку змащувальної здатності запропонованих ТЗМ у більш продуктивних процесах шліфування зі швидкостями більшими за 25 м/с.

#### Список літератури:

1. Пустырский С.В., Яковлев А.Л., Ночовная Л.А. Преимущества и применение высокопрочных титановых сплавов и перспективные направления при разработке новых // Вестник машиностроения, 2018, С.68 –71.
2. T. Zhu et al., Research progress of eco-friendly grinding technology for aviation nickel-based superalloys, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 126(2023) 2863–2886.
3. M. N. Sharif et al., Potential of alternative lubrication strategies for metal cutting processes: a review, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 89 (5-8) (2023) 2447–2479.
4. M. R. Caiet al., Lubricating a bright future: Lubrication contribution to energysaving and low carbon emission, *Sci. China. Tech. Sci.*, 56 (2013) 2888-2913.
5. S. H. Ali et al., Recent developments in MQL machining of aeronautical materials: A comparative review, *Chin. J. Aeronaut.*, (2024), <https://doi.org/10.1016/j.cja.2024.01.018>.
6. D. Lipi'nski et al., Analysis of the Cutting Abilities of the Multilayer Grinding Wheels – Case of Ti-6Al-4V Alloy Grinding, *Materials* 15 (1) (2022) 1-13.
7. W. Kacalak et al., Selected Aspects of Precision Grinding Processes Optimization, *Materials* 17 (2024) 607-624.
8. A. Rudnev et al., Diamond Spark Grinding of Hard Alloys Using Solid Lubricants, *Advances in Design, Simulation and Manufacturing (DSMIE)*, Lecture Notes in Mechanical Engineering (2021) 114 – 122.
9. E. Sevidova et al., An impact of Solid Lubrication on the Diamond Grinding Characteristics of Difficult-to-Machine Materials, *Advances in Design, Simulation and Manufacturing (DSMIE)*, Lecture Notes in Mechanical Engineering (2023) 337 – 346.
10. Кашук В.А., Верещагин А.Г. Справочник шлифовщика. – М.: Машиностроение, 1988. – 480 с.
11. Захаренко И. П. Алмазные инструменты и процессы обработки. – Киев: Техніка, 1980. – 215 с., Библиогр.: 209 – 213 с.
12. Смазочно-охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием: справочник / под общ. ред. Л.В. Худобина. - М.: Машиностроение, 2006.-544 с.
13. Худобин И.Л. О демпфирующем действии СОЖ при шлифовании // Вестник машиностроения. 1981. № 5. С. 55–57.
14. V. Panaioti et al., Assessing the Effectiveness of Solid Lubricants, *Russ. Engin. Res.*, 38 (6)(2018) 493–497.
15. V. Panaioti, Applying Solid Lubricant to the Grinding-Wheel Surface, *Russ. Engin. Res.* 37 (4) (2017) 359–362.
16. B.P. Ravuri et al., Performance evaluation of grinding wheels impregnated with graphene nanoplatelets, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 85(2016) 2235–2245.
17. Sevidova, E., Rudnev, A., Gasanov, M., Kotliar, A., Titarenko, O. An impact of Solid Lubrication on the Diamond Grinding Characteristics of Difficult-to-Machine Materials. In: Ivanov V. et al. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing. DSMIE 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. – pp. 337 – 346.

#### Bibliography (transliterated):

1. Pustyrsky S.V., Yakovlev A.L., Nochovnaya L.A. Advantages and application of high-strength titanium alloys and promising directions in the development of new ones // *Bulletin of Mechanical Engineering*, 2018, pp. 68–71.
2. T. Zhu et al., Research progress of eco-friendly grinding technology for aviation nickel-based superalloys, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 126(2023) 2863–2886.
3. M. N. Sharif et al., Potential of alternative lubrication strategies for metal cutting processes: a review, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 89 (5-8) (2023) 2447–2479.
4. M. R. Caiet al., Lubricating a bright future: Lubrication contribution to energy saving and low carbon emission, *Sci. China. Tech. Sci.*, 56 (2013) 2888-2913.
5. S. H. Ali et al., Recent developments in MQL machining of aeronautical materials: A comparative review, *Chin. J. Aeronaut.*, (2024), <https://doi.org/10.1016/j.cja.2024.01.018>.
6. D. Lipi'nski et al., Analysis of the Cutting Abilities of the Multilayer Grinding Wheels – Case of Ti-6Al-4V Alloy Grinding, *Materials* 15 (1) (2022) 1-13.
7. W. Kacalak et al., Selected Aspects of Precision Grinding Processes Optimization, *Materials* 17 (2024) 607-624.
8. A. Rudnev et al., Diamond Spark Grinding of Hard Alloys Using Solid Lubricants, *Advances in Design, Simulation and Manufacturing (DSMIE)*, Lecture Notes in Mechanical Engineering (2021) 114 – 122.
9. E. Sevidova et al., An impact of Solid Lubrication on the Diamond Grinding Characteristics of Difficult-to-Machine Materials, *Advances in Design, Simulation and Manufacturing (DSMIE)*, Lecture Notes in Mechanical Engineering (2023) 337 – 346.
10. Kashchuk V.A., Vereshchagin A.G. *Grinder's Handbook*. – М.: Mashinostroenie, 1988. – 480 p.
11. Zakharchenko I. P. *Diamond tools and processing*. – Kyiv: Tekhnika, 1980. – 215 p., Bibliography: 209–213 p.

12. Lubricating and cooling technological means and their application in cutting processing: reference book / under the general editorship of L. V. Khudobin. - M.: Mashinostroenie, 2006.-544 p.
13. Khudobin I. L. On the damping effect of coolant during grinding // Bulletin of mechanical engineering. 1981. No. 5. P. 55–57.
14. V. Panaiotti et al., Assessing the Effectiveness of Solid Lubricants, Russ. Engin. Res., 38 (6)(2018) 493–497.
15. V. Panaiotti, Applying Solid Lubricant to the Grinding-Wheel Surface, Russ. Engin. Res. 37 (4) (2017) 359–362.
16. B. P. Ravuri et al., Performance evaluation of grinding wheels impregnated with graphene nanoplatelets, Int. J Adv. Manuf. Technol.,85(2016) 2235–2245.
17. Sevidova, E., Rudnev, A., Gasanov, M., Kotliar, A., Titarenko, O. An impact of Solid Lubrication on the Diamond Grinding Characteristics of Difficult-to-Machine Materials. In: Ivanov V. et al. (eds) Advances in Design, Simulation and Manufacturing. DSMIE 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. – pp. 337 – 346.

Поступила (received) 17.09.2024

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

**Гасанов Магомедсмін Ісамагомедович (Hasanov Magomedemin)** – доктор технічних наук, професор кафедри «Технологія машинобудування та металорізальні верстати» Навчально-наукового інституту механічної інженерії і транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: +38 (057) 707-66-34; e-mail: [kh.hpi.hasanov@gmail.com](mailto:kh.hpi.hasanov@gmail.com), ORCID: 0000-0002-2161-2386

**Руднев Олександр Віталійович (Rudnev Aleksandr)** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник кафедри «Інтегровані технології машинобудування» ім. М.Ф.Семко Навчально-наукового інституту механічної інженерії і транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: +38 (057) 707-61-43; e-mail: [aleksandr1827.64@gmail.com](mailto:aleksandr1827.64@gmail.com), ORCID: 0000-0002-4091-6748

**Котляр Олексій Віталійович (Kotlyar Oleksii)** – доцент кафедри «Технологія машинобудування та металорізальні верстати» Навчально-наукового інституту механічної інженерії і транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: +38 (057) 707-66-34; e-mail: [Alexey\\_kotliar@ukr.net](mailto:Alexey_kotliar@ukr.net), ORCID: 0000-0001-7664-0395

**Титаренко Оксана Валеріївна (Titarenko Oksana)** – доцент кафедри інженерної механіки Національної академії Національної гвардії України м. Харків; тел.: +38 (057) 707-61-43; e-mail: [oksanatitarenko4179@gmail.com](mailto:oksanatitarenko4179@gmail.com), ORCID: 0000-0001-6811-7537

**Корчагин Ілля Геннадійович (Korchagin Ilya)** – аспірант кафедри «Технологія машинобудування та металорізальні верстати» Навчально-наукового інституту механічної інженерії і транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: +38 (057) 707-66-34; e-mail: ORCID: