

М. І. ГАСАНОВ, О. В. РУДНЕВ, О. В. КОТЛЯР, О. В. ТИТАРЕНКО, Д. В. КУЛІНА

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЗЕРНИСТОСТІ АЛМАЗНИХ КРУГІВ НА ПОКАЗНИКИ ШЛІФУВАННЯ

Проаналізовано результати досліджень впливу трьох варіантів алмазних кругів різної зернистості на ефективність шліфування та кінцевий результат, враховуючи різні поперечні подачі. Поверхні обирались серед важкооброблюваних матеріалів, що використовуються при виготовленні та ремонті стратегічно важливої техніки: твердого сплаву ВК6, титанового сплаву VT22 та жароміцної дисперсійно-твердіючої високолегованої нержавіючої сталі 10X11N23T3MR. Шліфування проводилося з використанням твердого змащувального матеріалу. Отримані результати дозволяють стверджувати, що правильний вибір зернистості алмазних кругів з урахуванням ТЗМ чи без нього, істотно впливає на якість та стабільність процесу шліфування важкооброблювальних матеріалів, зокрема на формування шорсткості поверхні, рівень сил різання та температурний режим.

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

M. I. HASANOV, A. V. RUDNEV, O. V. KOTLIAR, O. V. TYTARENKO, D. V. KULINA INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF DIAMOND WHEEL GRAIN SIZE ON GRINDING PERFORMANCE

The results of research on the impact of three types of diamond wheels with different grain sizes on grinding efficiency and the final outcome have been analyzed, taking into account various transverse feeds. The test surfaces were selected from among hard-to-machine materials used in the production and repair of strategically important equipment: VK6 hard alloy, VT22 titanium alloy, and heat-resistant dispersion-hardened high-alloy stainless steel 10Kh11N23T3MR. Grinding was carried out using a solid lubricant. The findings confirm that the correct choice of diamond wheel grain size, whether with or without solid lubricating material, significantly affects the quality and stability of the grinding process for hard-to-machine materials, particularly in terms of surface roughness, cutting force levels, and thermal conditions.

Keywords: diamond grinding, diamond wheels, solid lubricating materials, hard-to-machine materials, titanium alloy, heat-resistant dispersion-hardened high-alloy stainless steel, surface roughness.

Вступ. Шліфування є одним із найважливіших фінішних процесів механічної обробки, що забезпечує високу точність та чистоту поверхні заготовок. Саме завдяки шліфуванню можна досягти необхідних параметрів шорсткості та геометричної точності виробів, особливо якщо мова йде про важкооброблювальні матеріали. У практиці промислового шліфування широке застосування знайшли алмазні круги, що вирізняються надзвичайною твердістю і здатністю працювати з широким спектром матеріалів. Одним із ключових чинників, який суттєво впливає на ефективність шліфування алмазними кругами, є їх зернистість, або розмір зерен абразиву. За даними різних дослідників, правильний вибір зернистості забезпечує належний баланс між продуктивністю, точністю та стійкістю інструмента. При цьому, надто велике зерно може призвести до підвищеної шорсткості, а надто дрібне – до зростання сил різання та швидкого зношування інструмента. Тому правильна зернистість визначає оптимальні умови роботи кола та є одним із ключових критеріїв вибору алмазного інструмента в промислових умовах.

Аналіз останніх досліджень свідчить про те, що вплив зернистості алмазних кругів на формування поверхні заготовки ще не достатньо вивчений для ряду перспективних матеріалів. Зокрема, досі залишається не до кінця зрозумілим механізм формування мікрорельєфу при контактній взаємодії зерен різного розміру з оброблюваним матеріалом. Крім того, попит на деталі з високим вимогами до якості поверхні зростає, що підвищує актуальність вивчення процесів алмазного шліфування. Наразі розробляються нові марки алмазних кругів із різною зернистістю та зв'язками, що дозволяє удосконалювати процеси точного шліфування.

У промисловості також зростає інтерес до комплексного підходу, коли оптимальний розмір зерна поєднується з ефективними технологічними середовищами (СОТС, ТЗМ тощо). Водночас потрібні поглиблені дослідження силових і температурних характеристик з урахуванням змінної зернистості алмазних кругів. Вибір відповідної зернистості також впливає на економічні показники процесу, оскільки визначає витрати на інструменти й час обробки. До того ж, практики наголошують, що при обробці твердосплавних ті інших високотвердних матеріалів зернистість алмазного круга може суттєво впливати на виникнення мікротріщин. Тому дослідження механізмів взаємодії алмазного зерна заданого розміру з оброблюваною поверхнею дозволить зменшити дефекти та поліпшити якість виробів.

Отже, систематичне вивчення впливу зернистості на контактні процеси різання є важливим напрямком у підвищенні ефективності шліфування. В умовах зростання вимог до функціональних характеристик деталей, точність і стабільність шліфувального процесу набуває стратегічної важливості. Дослідження різних режимів шліфування, типів зв'язки та зернистостей у сукупності здатні забезпечити гнучке керування властивостями оброблюваної поверхні.

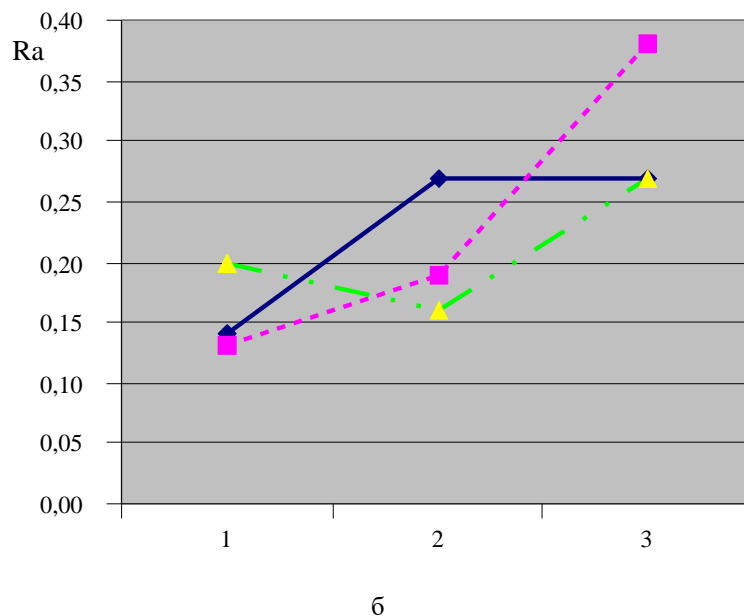
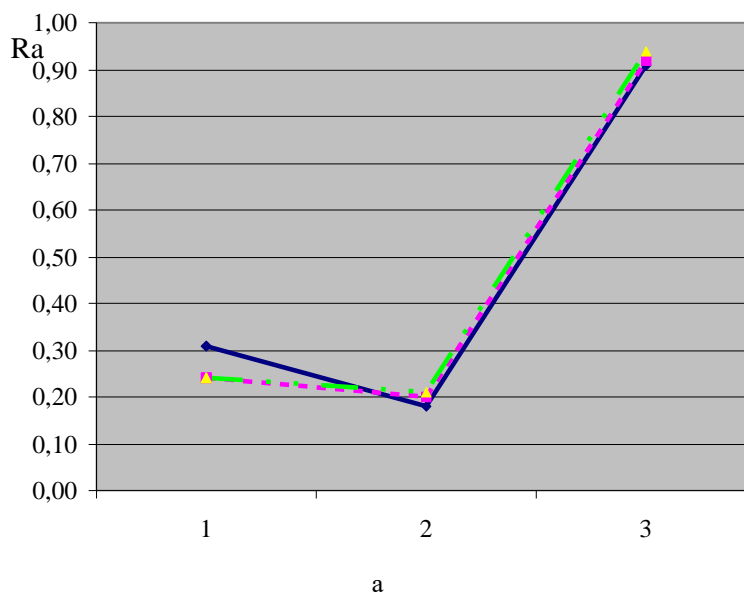
Матеріали дослідження.

Для проведення експериментальних досліджень вибрані круги з бакелітовою зв'язкою та зерном: АС4 50/40 100%, АС4 100/80 100% та АС4 160/125 100%; важкооброблювані матеріали: титановий сплав ВТ22, твердий сплав ВК6 та жароміцна дисперсійно-твердіюча високолегована нержавіюча сталь 10Х11Н23Т3МР В якості ТЗМ застосовували склад з 80% стеаринової кислоти та 20% нитриду бору (СтК 80% + ВN20%), що дозволив досягти найкращих показників шорсткості поверхні під час алмазного шліфування всіх важкооброблюваних матеріалів кругами різної зернистості.

Алмазне шліфування (АШ) виконували бакелітовими кругами на модернізованому універсально-заточному верстаті моделі ЗД642Е. Режими шліфування встановлювали при різних поперечних подачах без змащення та з використанням ТЗМ.

Результати.

Результати досліджень представлені нижче дозволяють зробити аналіз впливу зернистості алмазних кругів на показники шліфування при різних поперечних подачах на різні поверхні, без використання і з використанням ТЗМ.



—◆— 0,005 мм/подв. хід, —■— 0,01 мм/подв. хід, —▲— 0,015 мм/подв. хід

1 – 50/40, 2 – 100/80, 3 – 160/125 (а – без змащення, б – з використанням ТЗМ)

Рис. 1 – Вплив зернистості алмазних кругів на шорсткість поверхні ВК6 при різних поперечних подачах

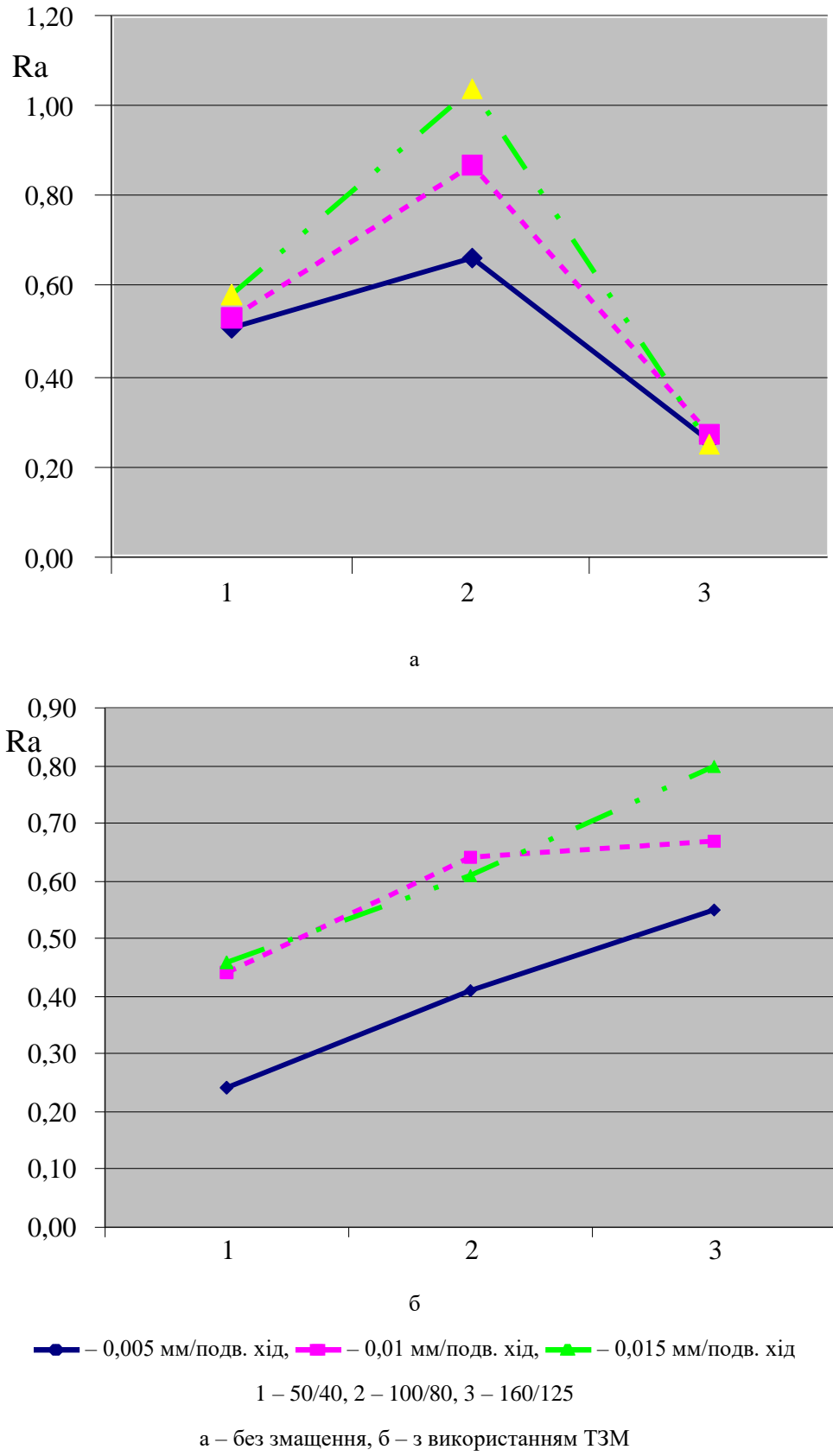
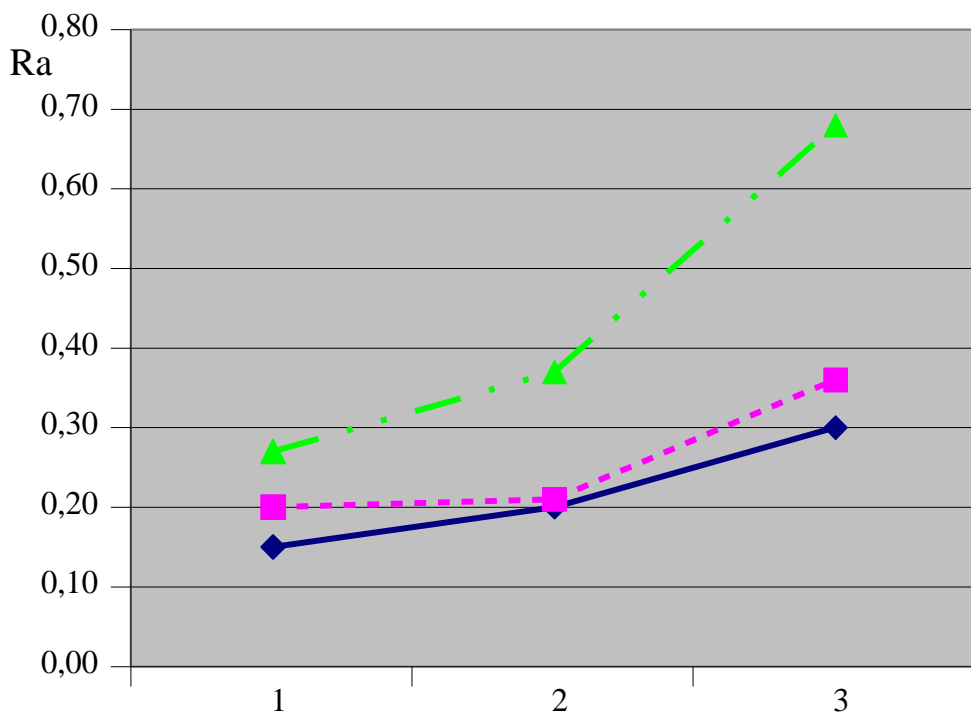
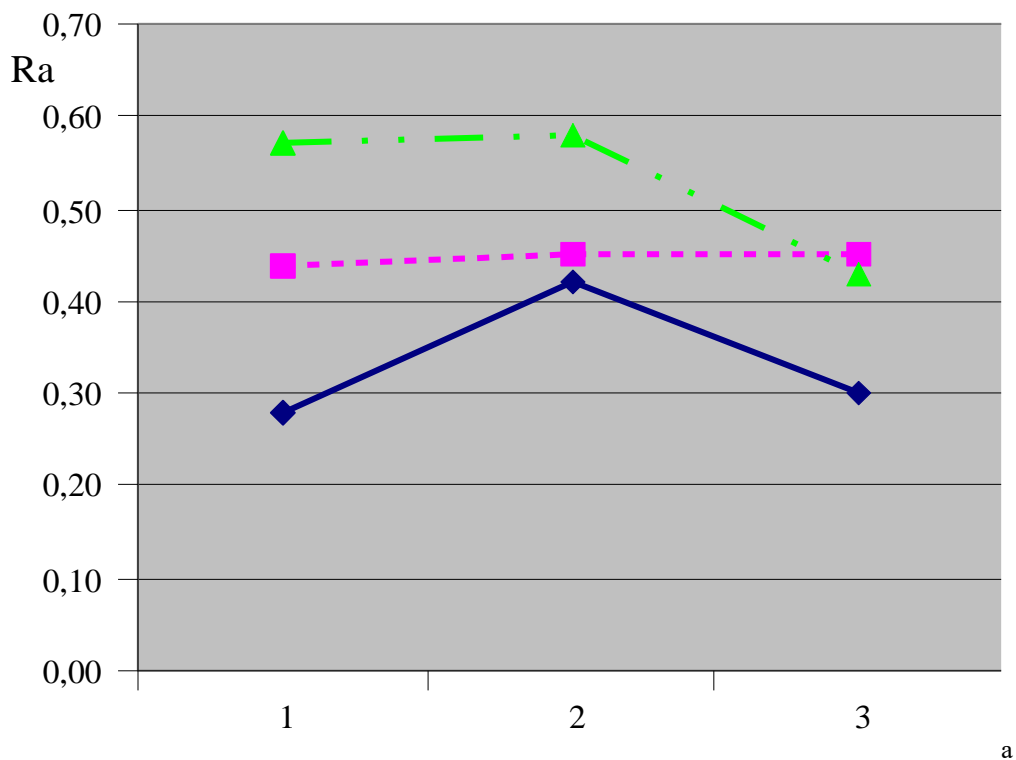


Рис. 2 – Вплив зернистості алмазних кругів на шорсткість поверхні ВТ22 при різних поперечних подачах



б

◆ – 0,005 мм/подв. хід,
 ■ – 0,01 мм/подв. хід,
 ▲ – 0,015 мм/подв. хід
 1 – 50/40, 2 – 100/80, 3 – 160/125

а – без змащення, б – з використанням ТЗМ

Рис. 3 – Вплив зернистості алмазних кругів на шорсткість поверхні сталі 10X11H23T3MP при різних поперечних подачах

Аналіз результатів досліджень Ra, представлених на рис. 1 дозволяє зробити деякі узагальнення. Зокрема, встановлено, що при сухому шліфуванні шорсткість поверхонь кожного із матеріалів зростає по мірі збільшення поперечної подачі. Ця закономірність узгоджується з основними засадами теорії абразивного шліфування і зберігається для усіх варіантів зернистостей круга.

Менш однозначно виглядає залежність показника Ra від зернистості круга за умов ідентичної подачі. В залежності від матеріалу і величини подачі при збільшенні зернистості круга від 50/40 до 160/125 в окремих точках спостерігаються «алогічні» зменшення шорсткості замість звичай прогнозованого росту [1].

Схожі ефекти були зафіксовані в дослідженнях [2] щодо шорсткості поверхонь різних матеріалів при їх шліфуванні кругами з різним ступенем правки – тонким, середнім та грубим. На нашу думку, це створює ріжучий рельєф кругів, який можна порівнювати з кругами різної зернистості. Однією з причин зменшення показника Ra може бути саме зміна ріжучого профілю, штучне зменшення висоти зерна за рахунок попадання, забивання міжзеренного простору продуктами шліфування.

Використання ТЗМ при шліфуванні в цілому привело до покращення показника Ra для всіх матеріалів, але з різним ступенем ефективності. Зокрема, найбільший ефект від змашування при шліфуванні ВК6 було досягнуто з кругом 50/40.

Зменшення Ra на всьому діапазоні поперечних подач при цьому складало 1,2...2,2 рази. Зі збільшенням зернистості круга до 100/80 шорсткість зменшилась тільки в 1,1 і 1,3 рази відповідно при подачах 0,01 і 0,015 мм/подв.хід. При подальшому збільшенні зернистості круга до 160/125 шорсткість або не змінюється, або навіть дещо збільшується.

Більш стабільний результат покращення Ra з використанням ТЗМ спостерігався при шліфуванні сплаву ВТ22 кругами усіх досліджуваних зернистостей. За показником коефіцієнта зменшення Ra можна помітити, що відносно ефективніше змашування проявляється з кругом 50/40 (1,2...2,1), найменш ефективно - з кругом 160/125 (1,2...1,7).

Найкращі результати удосконалення якості поверхні досягнуті при шліфуванні важкооброблюваної сталі 10X11H23ТЗМР. Використання ТЗМ з кругом зернистістю 50/40 забезпечило зменшення показника Ra в 1,9...2,2 рази, з кругом 100/80 - в 1,6...2,1 рази, а з кругом 160/125 - в 1,2...1,6 рази. Як і у попередніх випадках ефективність змашування зменшується з ростом зернистості круга.

Одержані результати цілком підпадають під відомі тези [3], що тверді змашувальні матеріали раціонально застосовувати саме на фінішних, чистових операціях шліфування.

Подальша оптимізація показників шліфування кругами більш високої зернистості може бути пов'язана з пошуком оптимальної кількості ТЗМ, достатньої для ефективного змашування, та її рівномірної подачі [4].

Аналіз значень постконтактної температури (рис. 4 – 6) показує, що вона збільшується з ростом поперечної подачі для кожного матеріалу, які шліфуються кругами однакової зернистості. Така закономірність зберігається як при сухій обробці, так і з використанням ТЗМ. За рідким виключенням (в основному при шліфуванні сплаву ВК6) спостерігається зниження постконтактної температури T_n при твердому змашуванні, що пов'язують зі зменшенням теплоти тертя, яке генерується в зоні контакту круга з поверхнею.

Менш однозначно виглядає залежність температури від зернистості кругів при шліфуванні на ідентичних подачах. Зокрема, для пластичних в'язких матеріалів ВТ22 і високолегованої сталі 10X11H23ТЗМР значення T_n збільшується з ростом зернистості шліфувального круга від 50/40 до 100/80, а при подальшому зростанні до 160/125 – зменшується. Така поведінка характеризує як сухий процес, так і з використанням ТЗМ. Схожі результати були встановлені при шліфуванні кругами, які піддавалися різним режимам правки [2]. Зменшення контактної температури пояснюють зміною характеру взаємодії, зменшенням долі сили тертя в загальній тангенціальній силі різання.

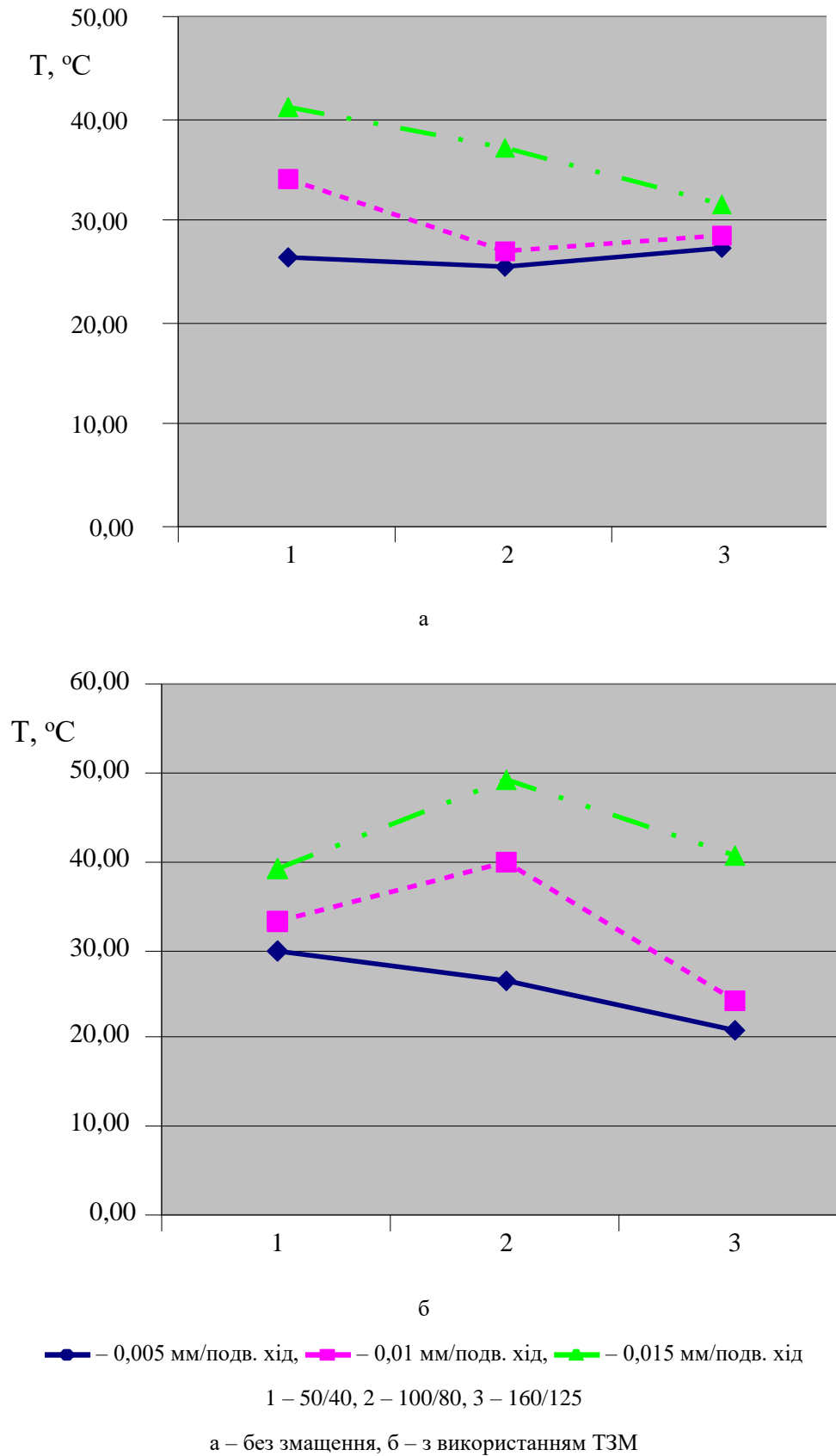


Рис. 4 – Вплив зернистості алмазних кругів на постконтактну температуру поверхні сплаву ВК6 при різних поперечних подачах

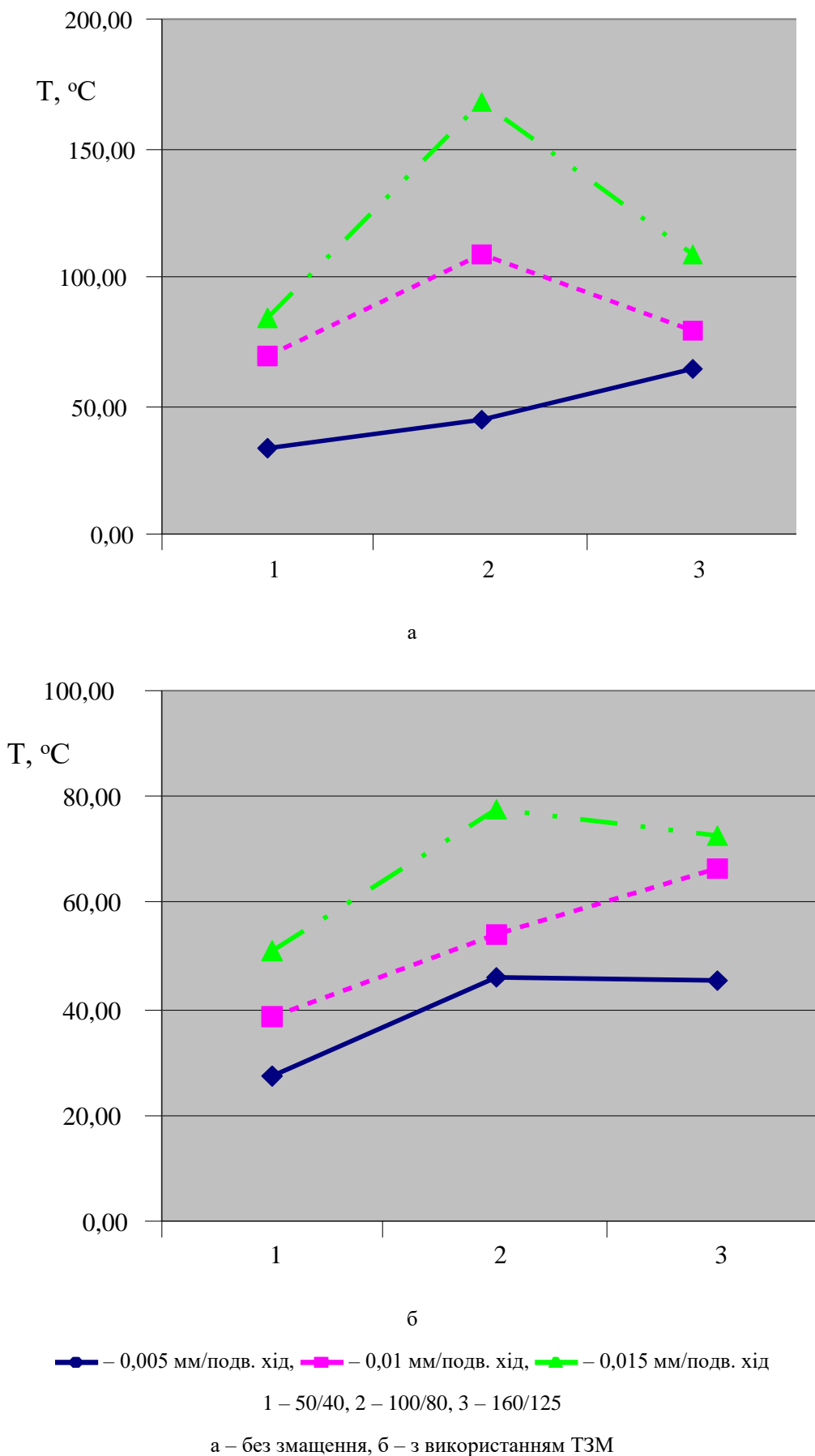
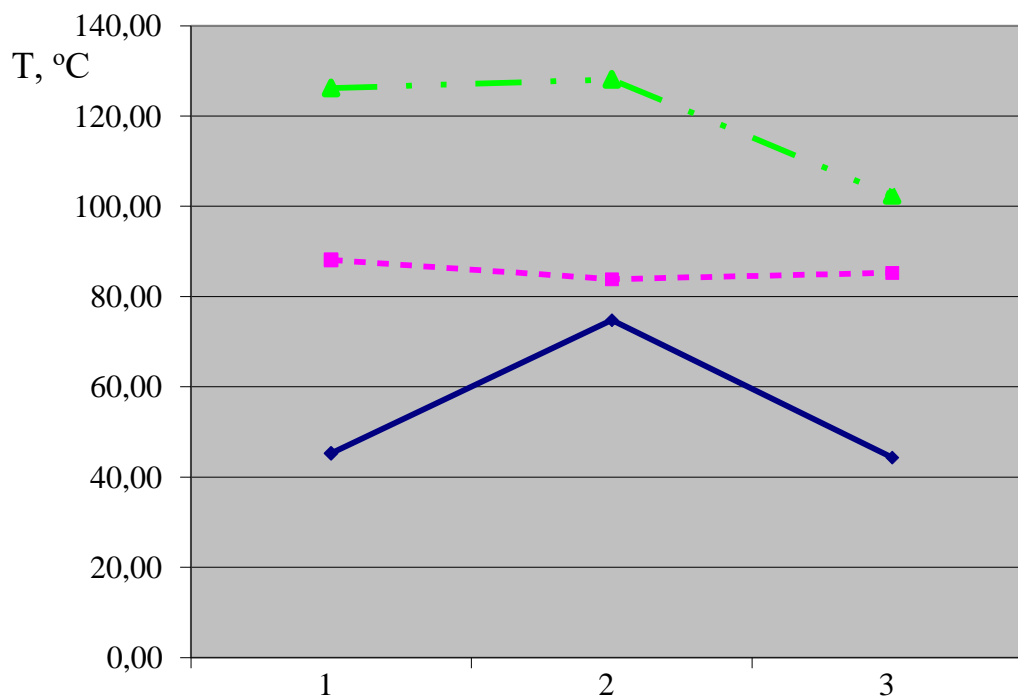
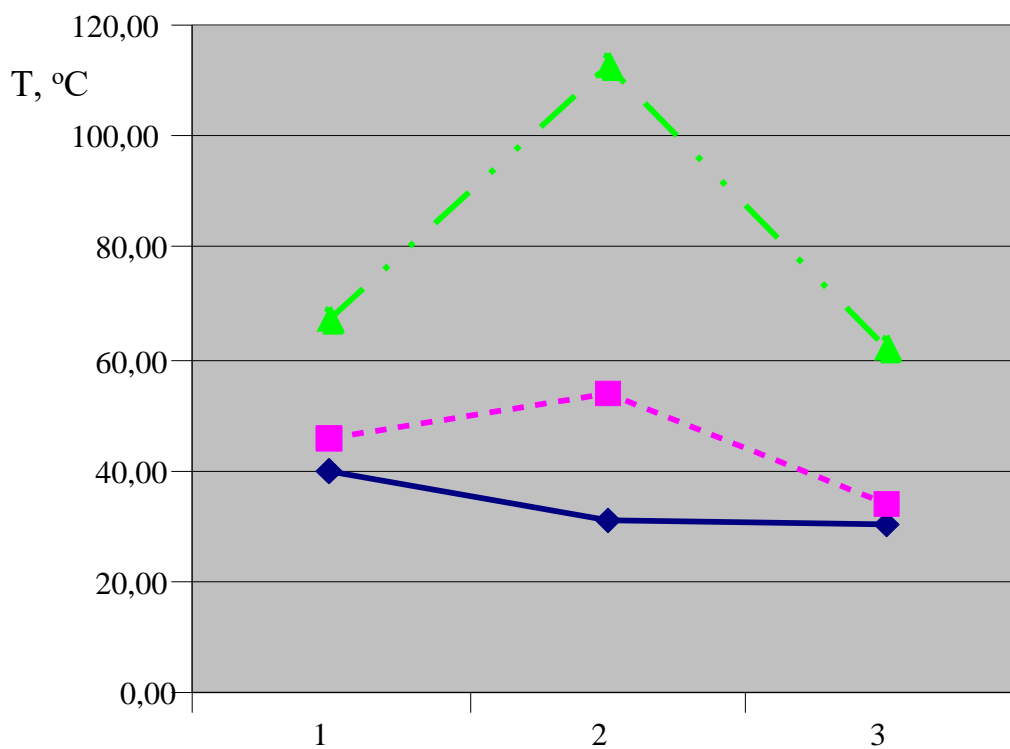


Рис. 5 – Вплив зернистості алмазних кругів на постконтактну температуру поверхні ВТ22 при різних поперечних подачах



a



б

— 0,005 мм/подв. хід, — 0,01 мм/подв. хід, — 0,015 мм/подв. хід

1 – 50/40, 2 – 100/80, 3 – 160/125

а – без змащення, б – з використанням ТЗМ

Рис. 6 – Вплив зернистості алмазних кругів на постконтактну температуру поверхні сталі 10X11H23T3MP при різних поперечних подачах

Оцінка впливу ТЗМ на зменшення температури, а, відповідно, і тангенціальної сили в зоні шліфування показує, що його ефективність суттєво залежить від природи матеріалу і режимів його обробки. Так, для сплаву ВК6 (рис. 4), цей вплив можна вважати мінімальним – зменшення T_n в 1,2 і 1,3 рази спостерігалось тільки при шліфуванні кругом 160/125 на подачах 0,01 і 0,005 мм/подв.хід відповідно.

Більш суттєво на зниження температури впливає змащення ТЗМ при шліфуванні титанового сплаву ВТ22 практично на всіх зернистостях кругів і подачах (рис. 5). В загальному випадку значення T_n може зменшуватись в 1,2...2,2 рази в залежності від режимів обробки.

Стабільне покращення, тобто зниження постконтактної температури спостерігалось при шліфуванні сталі 10X11H23T3MP у всьому діапазоні досліджуваних режимів (рис. 6). Коефіцієнт зниження T_n при цьому склав 1,2...2,5, а найбільше його значення 1,5...2,5 зафіксовано для обробки кругами максимальної зернистості.

Значення постконтактної температури опосередковано характеризує температуру в зоні контакту, яка, зазвичай, більш висока. Але її можна коректно використовувати в порівняльних характеристиках для вибору раціональних режимів обробки та найбільш придатних складів ТЗМ.

Висновки.

Зернистість алмазних кругів є визначальним фактором при шліфуванні важкооброблювальних матеріалів, оскільки саме розмір зерен істотно впливає на формування мікрорельєфу та рівень контактних температур у зоні різання.

Під час дослідження впливу зернистості алмазних кругів на показники шліфування було встановлено:

1. Найбільш низькі показники шорсткості Ra досягаються за мінімальної зернистості круга 50/40, що особливо помітно при обробці твердого сплаву ВК6 та високолегованої сталі 10X11H23T3MP. При цьому середня зернистість 100/80 може бути компромісним варіантом для підвищення продуктивності за прийнятної чистоти поверхні.

2. Зростання поперечної подачі 0,005 → 0,010 → 0,015 мм/подв.хід за будь-якої зернистості призводить до збільшення шорсткості та контактної температури, що свідчить про зростання сил тертя й інтенсивності шліфування матеріалу.

3. Впровадження твердих змащувальних матеріалів забезпечує зменшення Ra в середньому на 10-40% залежно від зернистості та режимів різання, а також зниження контактної температури в 1,2...2,2 рази, особливо під час обробки титанових та високолегованих сталей.

4. Контактні температури найвищі у випадку грубозернистих кругів 160/125, що зумовлено більшим об'ємом зрізаного матеріалу та інтенсивністю тертя у свою чергу, дрібнозернистий круг 50/40 генерує менше тепла, проте вимагає ретельнішого контролю зносу інструмента.

5. Матеріал заготовки визначає ступінь чутливості до зернистості: для ВК6 оптимальний баланс між Ra і стабільною температурою досягається за використанням дрібного зерна 50/40 з використанням ТЗМ; для ВТ22 слід віддавати перевагу середній 100/80 або дрібній зернистості 50/40 зі змащенням, що дозволяє уникнути надмірного перегріву; при шліфуванні сталі 10X11H23T3MP особливо важливо використовувати ТЗМ, адже це знижує нагрівання і ризик структурних пошкоджень поверхні.

Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення технологічних процесів шліфування важкооброблюваних матеріалів, оскільки дають змогу підібрати раціональні режими подачі та типи кругів (їх зернистість), а також доцільні складові в ТЗМ залежно від вимог до якості поверхні та рівня термічних впливів. Наведені дані дають цілісне уявлення про вплив різної зернистості алмазних кругів на шорсткість, температурні характеристики і ефективність шліфування загалом.

Список літератури:

1. Гавриш А.П., Роїк Т.А., Віцюк Ю.Ю., Хлус О.С. Особливості високошвидкісного шліфування композитних деталей тертя машино-технологічних комплексів // Вісник КНУДТ. – 2015. – №2. (84). – С. 77 - 88.
2. Ravuri B.P., Goriparthi B.K., Revuru R.S., Anne V.G. Performance evaluation of grinding wheels impregnated with graphene nanoplatelets // Int J Adv Manuf Technol – 2016. – 85. Pages 2235–2245. DOI 10.1007/s00170-015-7459-6.
3. Смазочно-охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием: справочник / под общ. ред. Л.В. Худобина. - М.: Машиностроение, 2006.-544 с.
4. Panaioti V.A. Applying Solid Lubricant to the Grinding-Wheel Surface // Russian Engineering Research. – 2017. – Vol. 37. – No. 4. – pp. 359 – 362.
5. 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.
6. 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.

7. 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.
8. M. R. Caiet al., Lubricating a bright future: Lubrication contribution to energysaving and low carbon emission, *Sci. China. Tech. Sci.*, 56 (2013) 2888-2913.
9. 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>.
10. D. Lipiński 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.
11. W. Kacalak et al., Selected Aspects of Precision Grinding Processes Optimization, *Materials* 17 (2024) 607-624.
12. 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.
13. 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.
14. Кашук В.А., Верещагин А.Г. Справочник шлифовщика. – М.: Машиностроение, 1988. – 480 с.
15. Захаренко И. П. Алмазные инструменты и процессы обработки. – Киев: Техніка, 1980. –215 с., Библиогр.: 209 –213 с.
16. Худобин И.Л. О демпфирующем действии СОЖ при шлифовании // Вестник машиностроения. 1981. № 5. С. 55–57.
17. V. Panaioti et al., Assessing the Effectiveness of Solid Lubricants, *Russ. Engin. Res.*, 38 (6)(2018) 493–497.
18. 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. Gavrish A.P., Roik T.A., Vitsyuk Y.Yu., Khlus O.S. Features of high-speed grinding of composite friction parts of machine-technological complexes // *Bulletin of the KNUDT*. – 2015. – No. 2. (84). – P. 77 - 88.
2. Ravuri B.P., Goriparthi B.K., Revuru R.S., Anne V.G. Performance evaluation of grinding wheels impregnated with graphene nanoplatelets // *Int J Adv Manuf Technol* – 2016. – 85. Pages 2235–2245. DOI 10.1007/s00170-015-7459-6.
3. Lubricating and cooling technological means and their use in cutting: reference book / pod obsch. ed. L.V. Livestock - M.: Mashinostroenie, 2006.-544 p.
4. Panaioti V.A. Applying Solid Lubricant to the Grinding-Wheel Surface // *Russian Engineering Research*. – 2017. – Vol. 37. – No. 4. – pp. 359 – 362.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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>.
10. D. Lipiński 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.
11. W. Kacalak et al., Selected Aspects of Precision Grinding Processes Optimization, *Materials* 17 (2024) 607-624.
12. 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.
13. 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.
14. Kashchuk V.A., Vereshchagin A.G. *Grinder's Handbook*. – М.: Mashinostroenie, 1988. – 480 p.
15. Zakharchenko I. P. *Diamond tools and processing*. – Kyiv: Tekhnika, 1980. –215 p., Bibliography: 209–213 p.
16. Khudobin I. L. On the damping effect of coolant during grinding // *Bulletin of mechanical engineering*. 1981. No. 5. P. 55–57.
17. V. Panaiotti et al., Assessing the Effectiveness of Solid Lubricants, *Russ. Engin. Res.*, 38 (6)(2018) 493–497.
18. 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.

Відомості про авторів / About the Authors

Гасанов Магомедємін Ісамагомедович (Hasanov Magomediemin) – проректор з науково-педагогічної роботи, 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, ORCID: 0000-0002-2161-2386

Руднєв Олександр Віталійович (Rudnev Aleksandr) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник кафедри «Інтегровані технології машинобудування» ім. М. Ф. Семка 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, ORCID: 0000-0002-4091-6748

Котляр Олексій Віталійович (Kotliar Oleksiï) – 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, 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, ORCID: 0000-0001-6811-7537

Куліна Дмитро Володимирович (Kulina Dmytro) – 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: dmytro.kulina@mit.khpi.edu.ua, ORCID:0009-0001-5973-1516