УДК 621.923

О. В. Тітаренко

О. К. Севидова

О. В. Руднєв

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТВЕРДОГО ЗМАЩУВАННЯ НА ПОКАЗНИКИ ПРОЦЕСУ АЛМАЗНОГО ШЛІФУВАННЯ ВІДПОВІДАЛЬНИХ ДЕТАЛЕЙ З ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ

Досліджено вплив твердого змащування на показники процесу алмазного шліфування важкооброблюваного титанового сплаву ВТ22, який ефективно замінює сталь в об'єктах військової техніки. Оцінювання проведено за показниками параметра шорсткості поверхні Ra та постконтактної температури $T_{пк}$. *Встановлено, що використання твердого змащувального матеріалу на основі стеаринової кислоти та дисульфіду молібдену зменшує постконтактну температуру і шорсткість, порівнюючи з шліфуванням без змащування. Твердий змащувальний матеріал неоднозначно впливає на показник Ra залежно від поперечної подачі, що пов'язано зі зміною агрегатного стану стеаринової кислоти та підвищенням її поверхневої активності.*

К л ю ч о в і с л о в а: твердий змащувальний матеріал, алмазне шліфування, титановий сплав, шорсткість, важкооброблювані матеріали, постконтактна температура.

Постановка проблеми. Військові дії в Україні змусили активно модернізувати засоби оснащення ЗСУ з урахуванням більш широкого спектра цілей і загроз. Маневреність, швидкість і точність дій військових значною мірою визначаються легкістю, міцністю і надійністю озброєння, засобів особистого захисту та засобів контролю перебігу воєнних дій. Саме тому у виробників військової промисловості в останні роки помітно зріс попит на конструкційні матеріали з групи титанових сплавів, які у відповідальних деталях машин здатні бути гідною альтернативою важким сталевим матеріалам.

Так, заміна частини деталей буксирувальної гаубиці М 777 на деталі, виготовлені з титанових сплавів, дозволила зменшити її вагу до 4,2 т, порівнюючи з вагою «Мста-Б» – 7 т. У результаті вдалося помітно скоротити час на зайняття вогневої позиції, виконання вогневої задачі та зміну позиції [1].

Найновіша версія гранатомета Carl Gustaf-M4 завдяки застосуванню титанового сплаву у конструкції пускового контейнера тепер важить 6,7 кг, що на 3 кг менше від М3, і вдвічі менше, порівнюючи з М2 (14,2 кг). Загальні габарити гранатомета М4 зменшені до 1000 мм, проте, полегшена титано-вуглепластикова конструкція забезпечує такий самий термін служби 1000 пострілів, як і у М3 [2].

Титанові сплави також знайшли своє гідне місце і в сучасних приладах нічного бачення (рис. 1), забезпечивши оптимальну адаптацію військовиків до вимог бою [3]. Вони і досі утримують позиції найкращих матеріалів для захисних жилетів, витримуючи удари майже всіх видів стрілецької зброї та маючи вагу до 40 % меншу за броньовану сталь.

© О. В. Тітаренко, О. К. Севидова, О. В. Руднєв, 2022

Рисунок 1 – Модульний комплект нічного бачення MZN-1 (Польща)
з покращеною ергономікою [3]

Надійність роботи кожної деталі з титанового сплаву визначається якістю, що закладається на кожному з етапів виробництва. Найбільш відповідальні деталі, що працюють у парах з'єднання або парах тертя, підлягають обов'язковій обробці шліфуванням. Внаслідок особливих фізико-механічних властивостей титану (висока адгезійна активність, в'язкість, міцність, мала теплопровідність) його обробка різанням є важким завданням. Всі титанові сплави відносять до групи важкооброблюваних. Їх шліфування супроводжується налипанням на абразивні зерна, що суттєво зменшує період стійкості круга, збільшує зношення інструменту, отже, погіршує якість обробленої поверхні. Суттєво зменшити зазначені ефекти вдається шляхом використання великої кількості (десятки літрів за хвилину) змащувально-охолоджувальних технологічних засобів (ЗОТЗ). Недоліком такого рішення є забруднення навколишнього середовища, небезпека для здоров'я людини та надмірні витрати водних ресурсів.

Альтернативним варіантом рідких ЗОТЗ можуть бути тверді змащувальні матеріали (ТЗМ). Ефективні ТЗМ у декілька разів здатні зменшити витрати абразивних зерен і при цьому дозволяють інтенсифікувати режими шліфування без припалів на оброблюваних поверхнях [4].

Зазвичай до складу ТЗМ входять базові наповнювачі або зв'язки, антифрикційні, протизносні модифікатори та хімічно активні компоненти [5], які знижують сили різання, тертя та температуру в зоні обробки, що сприяє покращенню показників процесу шліфування. Крім того, ТЗМ характеризуються екологічністю і зручністю нанесення на інструмент, не спричинюють корозії деталей та устаткування, не забруднюють робочі місця та набагато легше піддаються біологічному розкладанню. Подальший розвиток і поширення практичного впровадження твердого змащування для металообробки важкооброблюваних титанових сплавів пов'язаний саме з розробкою і дослідженням нових видів твердих мастил.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Тверді змащувальні матеріали як різновид ЗОТЗ почали використовувати для механічної обробки металів, зокрема шліфування, у 80-х роках XX ст. [6]. Їх доцільність незаперечна у тих випадках, коли застосування традиційних ЗОТЗ ускладнено, не припустимо або не забезпечує технологічного ефекту. Це актуально для верстатів, не оснащених системою подачі рідких ЗОТЗ, у процесі обробки деталей з похилими або вертикальними поверхнями і матеріалів, схильних до тріщиноутворення, налипання на інструмент тощо [7].

Стосовно титанових сплавів переважна більшість досліджень щодо заміни рідких ЗОТЗ пов'язана з використанням технологій мінімального змащування. Так, при шліфуванні сплаву ВТ6 вдається зменшити витрати ЗОТЗ до 60 мл/год у разі їх подачі у суміші з повітрям з встановленим тиском 4 атм.

[8], проте, досягти кращої якості обробленої поверхні, порівнюючи з традиційним змащуванням поливом, проблематично: на обробленій поверхні спостерігаються залишки оплавленості та припалів. Найкращі результати за таких умов показують синтетичні, а не природні мастила, що, на жаль, не задовольняє вимоги екологічності.

У праці [9] доведено, що застосування технології мінімального змащування для шліфування титанових сплавів ВТ6 та ВТ22 покращує їх утомну міцність та мінімізує структурні неоднорідності у поверхневому шарі, а також дозволяє суттєво збільшити зносостійкість абразивного круга. Головною умовою досягнення бажаних результатів є забезпечення рівномірного і дозованого потрапляння ЗОТЗ у зону шліфування, що не завжди можливо, особливо у випадку обробки складнопрофільних поверхонь.

Аналіз наукових джерел [1–10], результатів попередніх власних досліджень [11] показує, що на сьогодні не існує універсального складу ТЗМ, який би забезпечував оптимальні показники обробки важкооброблюваних матеріалів. Марка матеріалу, параметри режиму шліфування, зернистість круга і спосіб подачі ТЗМ впливають на якість оброблюваної поверхні та теплові ефекти в зоні контакту.

Мета досліджень – оцінити вплив твердого змащування на показники алмазного шліфування титанового сплаву ВТ22.

Виклад основного матеріалу. Для проведення експериментальних досліджень було вибрано титановий сплав ВТ22, який найчастіше використовується для військових потреб. До його складу входять: Fe – від 0,5 % до 1,5 %; C – до 0,1 %; Si – до 0,15 %; Cr – від 0,5 % до 2 %; Mo – від 4 % до 5,5 %; V – від 4 % до 5,5 %; N – до 0,05 %; Al – від 4,4 % до 5,9 %; Zr – до 0,3 %; O – до 0,2 %; H – до 0,015 %; Ti – від 78,485 % до 86,6 %.

Механічну обробку здійснювали за методом алмазного шліфування на універсальному заточному верстаті 3Д642Е кругами з бакелітовою зв’язкою АС4 50/40 100 % В2-01.

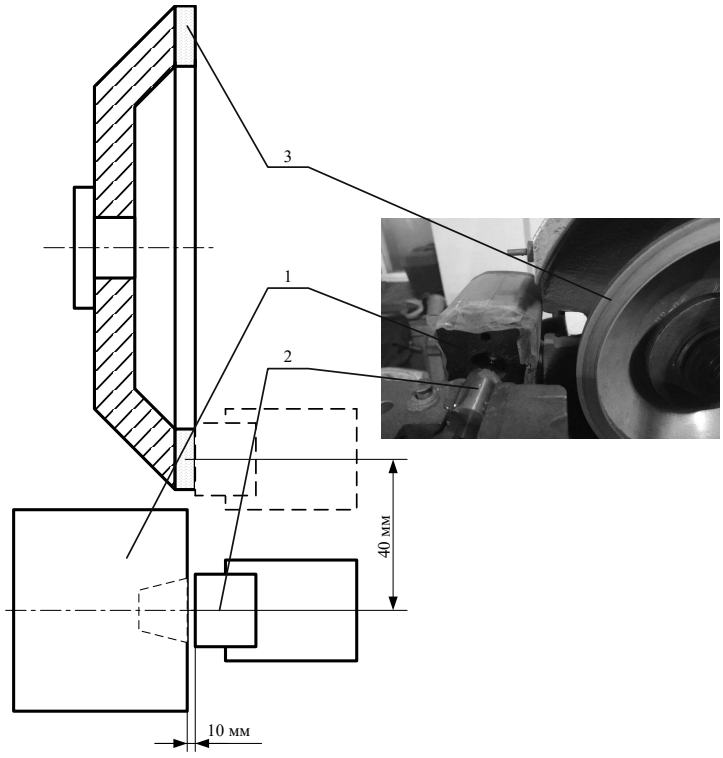
Технологічні режими шліфування були вибрані на основі даних довідника [10] та результатів власних попередніх досліджень [11], зокрема швидкість різання складала 25 м/с, подовжня швидкість – 1 м/хв. Шліфування проводили за жорсткою схемою з поперечними подачами $S_{\text{поп}}$, що дорівнювали 0,005 мм; 0,01 мм та 0,015 мм за подвійний хід (мм/дв. хід). Ці режими взяті як такі, що можуть забезпечувати задовільну якість титанового сплаву при фінішному шліфуванні. Вибір показника поперечної подачі як досліджуваного параметра ґрунтувався на відомих даних [12] про його головну роль у формуванні контактної температури в зоні шліфування, отже, й у впливі на якість оброблюваної поверхні та технологічні показники процесу.

Вибір і формування експериментального складу ТЗМ для досліджень проводили з урахуванням аналізу джерел [4, 5, 10]. Для проведення досліджень була вибрана композиція, до складу якої входила стеаринова кислота (65 %) та дисульфід молібдену (35 %). ТЗМ використовували у вигляді олівця діаметром 12 мм. Змащування здійснювали шляхом його дотику впродовж 1-2 секунд до алмазного круга в робочому режимі через кожні два подвійні ходи на третьому.

Вплив ТЗМ на процеси шліфування оцінювали за двома показниками: шорсткістю оброблюваної поверхні *Ra* і величиною постконтактної температури $T_{\text{пк}}$. Після чого їх порівнювали з даними шліфування без ЗОТЗ (сухого шліфування).

Шорсткість вимірювали на профілометрі-профілографі SURTRONIC 3+ (Taylor Hobson) і визначали як середньоарифметичне п’яти вимірів.

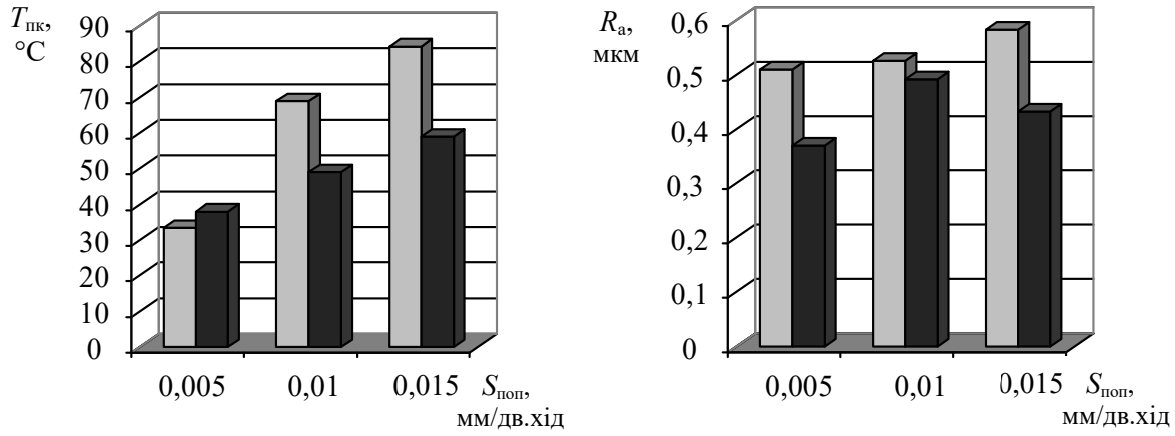
Показник постконтактної температури $T_{\text{пк}}$ використовували для якісної оцінки теплового ефекту в зоні шліфування. Їй відповідало значення температури, виміряне за допомогою пірометра Flus IR-833 (Flus) на шліфованій поверхні зразка після виходу із зони контакту з кругом (рис. 2).



1 – пірометр; 2 – зразок (деталь); 3 – шліфувальний круг
Рисунок 2 – Схема вимірювання постконтактної температури

Аналіз результатів досліджень (рис. 3) показує, що використання ТЗМ неоднозначно впливає на показники процесу шліфування, а залежить від параметрів режиму обробки.

За малої поперечної подачі (0,005 мм/дв. хід) чинник постконтактної температури від дії ТЗМ (рис. 3, *а*) майже нівелюється чи навіть не суттєво збільшується. Це можна пояснити, по-перше, мінімальним тепловиділенням при такому режимі, по-друге, наступним охолодженням на повітрі, які на змащених зразках уповільнюються через наявність на їх поверхні твердих плівок стеаринової кислоти.



а – постконтактна температура; *б* – шорсткість обробленої поверхні

Рисунок 3 – Вплив твердого змащування на показники алмазного шліфування титанового сплаву ВТ22

Найбільш суттєво ТЗМ зменшує постконтактну температуру, а опосередковано і тепловиділення в зоні шліфування, у разі обробки титанового сплаву з поперечними подачами $S_{поп}$, що дорівнювали 0,01 мм/дв. хід та 0,015 мм/дв. хід. Значення $T_{пк}$ зменшується від 1,4 разу до 2,1 разу порівняно з процесом без змащування.

Застосування ТЗМ однозначно позитивно впливає на якість поверхонь сплаву ВТ22 – зменшує параметр шорсткості *Ra* від 1,3 разу до 1,5 разу у всьому діапазоні поперечних подач (рис. 3, *б*). Взагалі, характер впливу змащування на параметр шорсткості достатньо неоднозначний: при збільшенні подачі до $S_{поп}$ = 0,015 мм/дв. хід спостерігається зменшення параметра шорсткості *Ra* до рівня 0,42 мкм. Він більше, ніж $T_{пк}$, залежить від параметра режиму обробки $S_{поп}$.

Одним з пояснень даного факту, на наш погляд, може бути зміна пріоритетної дії функціональних властивостей ТЗМ: диспергуючої та демпфуючої [10, 13]. Прояв диспергуючих властивостей ТЗМ пояснюється більш високою контактною температурою, зміною агрегатного стану стеаринової кислоти (зменшенням в'язкості), підвищенням її поверхневої активності, високим тиском. Усі вказані чинники і можливість накопичення ТЗМ у структурі ВТ22, ймовірно, є причиною зміни фізико-механічних властивостей і полегшення умов пластичної деформації.

Демпфуюча дія властивостей ТЗМ може бути також пов'язана зі зміною в'язкості їх складових і утворенням на поверхні зерна та заготовок товстих адсорбційних плівок, що призводить до режиму гідродинамічного змащування і більш тривалого ковзання зерна по поверхні. При цьому глибина занурення зерна стає меншою, отже, спостерігається зменшення шорсткості.

Таким чином, використання ТЗМ на основі стеаринової кислоти (65 %) та дисульфіду молібдену (35 %) у алмазному шліфуванні сплаву ВТ22 виправдовує себе у всьому дослідженому діапазоні поперечних подач, однак, для забезпечення високої продуктивності слід вибирати подачі від 0,015 мм/дв. хід. Подальше покращення показників якості поверхні титанового сплаву, скоріше за все, може бути реалізоване збільшенням швидкості шліфування та варіюванням зернистістю і абразивним матеріалом шліфувального круга.

Висновки

Технологічні властивості титанових сплавів та сучасні вимоги до екологічності та економічності виробничих процесів потребують ретельного та ґрунтовного підбору параметрів процесу шліфування. Одним із шляхів зменшення витрат шкідливих рідких засобів є використання твердих змащувальних матеріалів, що наносять на шліфувальний круг. Вони забезпечують такі теплофізичні умови, за яких формується поверхня достатньої якості.

У статті досліджена можливість застосування твердих змащувальних матеріалів на основі стеаринової кислоти (65 %) і дисульфіду молібдену (35 %) для операцій фінішного алмазного шліфування титанового сплаву ВТ22.

Встановлено, що ТЗМ неоднозначно впливає на показники алмазного шліфування: постконтактну температуру $T_{пк}$ і параметр шорсткості поверхні *Ra.* Внаслідок зміни в'язкості стеаринової кислоти з підвищенням температури та збільшенням подачі в зоні різання утворюються кращі умови для зниження шорсткості. Вона більше, ніж $T_{пк}$, залежить від параметра режиму обробки $S_{поп}$.

Для забезпечення високої продуктивності обробки титанового сплаву ВТ22 запропоновано режим алмазного шліфування зі швидкістю різання 25 м/с, подовжньою швидкістю 1 м/хв та поперечною подачею $S_{поп} \geq 0{,}015$ мм/дв. хід.

Показник $T_{пк}$ можливо ефективно застосовувати на етапі первинних досліджень з вибору раціональних складів ТЗМ для шліфування матеріалів.

Найкращі результати від використання ТЗМ дослідженого складу (мінімальна шорсткість поверхні) досягнуті у випадку алмазного шліфування з поперечною подачею $S_{поп}$ = 0,05 мм/дв. хід, що є підставою вважати такий склад ТЗМ перспективним для обробки схожих матеріалів (ВТ6, ВТ14, ВТ16).

Перелік джерел посилання

1. Інформаційний інтернет-портал. URL: https://defence-ua. com/news/hit_and_run_u_diji_jak_ zsu_pratsjujut_na_peredovij_z_m777_za_vsima_nastanovami_nato_video-8131.html (дата звернення: 30.10.2022).

2. Інформаційний інтернет-портал. URL: https://defence-ua. com/weapon_and_tech/carl_gustaf_ta _inshi_jak_rozrobniki_svitu_shukajut_optimalni_shljahi_posilennja_potentsialu_pihoti_na_poli_boju_chasti na_1-5035.html (дата звернення: 30.10.2022).

3. Інформаційний інтернет-портал. URL: https://defence-ua.com/news/polska_kompanija_pco_sa_na_ mspo_2020_predstavila_novi_optiko_elektronni_priladi-1622.html (дата звернення: 30.10.2022).

4. Рутман П. А., Лобанцова В. С. Использование твёрдых смазок с легкоплавкими металлическими наполнителями при обработке металлов резанием. *Смазочно-охлаждающие технологические средства в процессах абразивной обработки. Теоретические основы и техника применения* : сб. науч. тр. Ульяновск, 1988. С. 112–117.

5. Смазочно-охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием : справочник / Л. В. Худобин и др. Москва : Машиностроение, 2006. С. 164–167.

6. Ravuri B., Goriparthi B., Revuru R. Performance evaluation of grinding wheels impregnated with graphene nanoplatelets. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2016. Vol. 85, No 9–12. Pp. 2235–2245.

7. Cai M., Guo R., Zhou F. Lubricating a bright future : Lubrication contribution to energy saving and low carbon emission. Sci. China Tech. Sci. 2013. Vol. 56, No 12. Pp. 2888 – 2913.

8. Sadeghi M., Haddad M., Tawakoli T., Emami M. Minimal quantity lubrication-MQL in grinding of Ti–6Al–4V titanium alloy. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2009. Vol. 44, No 5, 6. Pp. 487–500.

9. Effect of Various Lubricating Strategies on Machining of Titanium Alloys / S. Kumari et al. *A State-of-the-Art Review*. Coatings. 2022. Vol. 12, Pp. 1178–1206.

10. Энтелис С. Г., Берлинер Э. М. Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки металлов резанием : справочник / под ред. С. Г. Энтелиса, Э. М. Берлинера. Москва : Машиностроение, 1986. 352 с.

11. Diamond Spark Grinding of Hard Alloys Using Solid Lubricants / A. Rudnev et al. Proc. 4th Int. Conf. DSMIE-2021, Vol. 1. Pp. 114–122.

12. Panaioti V., Asadova Yu., Nemenko M. Assessing the effectiveness of solid lubricants. *Russian Engineering Research*. 2018. Vol. 38, No. 6. Pp. 493–497.

13. Душко О. В., Шумячер В. М., Башкирцева И. В. Исследование влияния смазочно-охлаждающей жидкости на коэффициент трения абразива по металлу. *Технология машиностроения*. 2005. № 12. С. 39–41.

Стаття надійшла до редакції 20.09.2022 р.

UDC 621.923

O. Titarenko, O. Sevidova, O. Rudnev

STUDY OF THE INFLUENCE OF SOLID LUBRICATION ON INDICATORS OF THE DIAMOND GRINDING PROCESS OF RELEVANT PARTS FROM TITANIUM ALLOYS

Titanium alloys are widely used in military equipment because of theirs excellent physical properties, such as corrosion resistance, heat resistance, fatigue resistance, and high specific strength. However, the hardness and strength of titanium alloy are high, and the coefficient of thermal conductivity is poor, so the cutting performance is poor. The influence of solid lubricant on the parameters of the process of diamond grinding of hard-to-cut material – titanium alloy VT22 was studied. The evaluation was carried out on the basis of the surface roughness parameter Ra and the postcontact temperature T_{pc}. It has been established that the use of a solid lubricant based on stearic acid (65%) and molybdenum disulfide (35%) reduces the post-contact temperature by 1.4 ... 2.1 times and the roughness by 1.3 ... 1, 6 times in comprising with results

under dry grinding conditions. Solid lubricant has an ambiguous effect on the grinding performance of VT22 depending on transverse feed. It may be linked up to state transition of stearic acid and growth its surface activity. The best results on the surface quality with solid lubrication were achieved under grinding with cutting speed V_c = 25 m/s and transverse feed f = 0.005 mm/double pass.

K e y w o r d s: solid lubricant, diamond grinding, surface roughness, hard-to-cut material, titanium alloy, stearic acid, molybdenum disulfide, post-contact temperature.

Тітаренко Оксана Валеріївна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерної механіки Національної академії Національної гвардії України.

http://orcid.org/0000-0001-6811-7537

Севидова Олена Костянтинівна – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник кафедри інтегрованих технологій машинобудування ім. М. Ф. Семка Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

http://orcid.org/0000-0001-8762-6230

Руднев Олександр Віталійович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник кафедри інтегрованих технологій машинобудування ім. М. Ф. Семка Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

http://orcid.org/0000-0002-4091-6748