

МЕЛЬЧЕНКО АНДРІЙ

Вінницький національний технічний університет
e-mail: 3360333@gmail.com

ВІШТАК ІННА

Вінницький національний технічний університет
<https://orcid.org/0000-0001-5646-4996>
e-mail: innavish322@gmail.com

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ДОСЯГНЕНЬ МЕТОДІВ ХІМІКО-ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ ШПИНДЕЛЬНОГО ВУЗЛА

В роботі наведено результати досліджень сучасних методів хіміко-термічної обробки деталей шпиндельного вузла. Визначено що зносостійкість деталей шпиндельного вузла є визначальним чинником для забезпечення точності та надійності механізму, особливо за умов високошвидкісної обробки. Оскільки зносостійкість є критичним показником для шпиндельних вузлів, її підвищення безпосередньо впливає на точність, надійність та стабільність роботи механізму, що особливо важливо у високошвидкісних умовах обробки. Досліджено можливості хіміко-термічної обробки, зокрема методів, таких як термічне окислення, нітрація, карбонізація, які дозволяють формувати захисний шар на поверхні деталей, значно підвищуючи їх зносостійкість. Дослідження показують, що термічне окислення титанових сплавів сприяє утворенню оксидного шару, що підвищує твердість і опір до зносу навіть у високотемпературних умовах, що критично для довговічності та стабільності шпиндельних вузлів. Методи іонного азотування, збагачуючи поверхню азотом у низькотемпературній плазмі, дозволяють досягти підвищеної міцності та твердості деталей без ризику деформації поверхні. Додатково в статті розглянуто технології карбонізації, що підвищують зносостійкість і ударну в'язкість сталевих деталей, а також новітні підходи, такі як комбіновані методи. Визначено, що впровадження хіміко-термічної обробки є необхідним етапом у виробництві шпиндельних вузлів, оскільки вона не тільки підвищує стійкість до зносу, але й сприяє загальному збільшенню терміну експлуатації та надійності деталей, зменшуючи витрати на обслуговування. Встановлено важливість оптимізації параметрів процесу обробки та необхідність подальших досліджень у цій сфері для створення нових, ефективніших технологій зміцнення поверхонь. Застосування хіміко-термічної обробки, зокрема комбінованих способів, дозволяє значно підвищити опір зношуванню завдяки формуванню захисного шару на поверхні деталей. Це сприяє підвищенню їх довговічності та продуктивності, забезпечуючи стабільну роботу механізму.

Ключові слова: поверхня, хіміко-термічна обробка, метод, зносостійкість, шпиндельний вузол.

MELCHENKO ANDRII, VISHTAK INNA
Vinnytsia National Technical University

ANALYSIS OF MODERN ACHIEVEMENTS IN METHODS OF CHEMICAL-THERMAL TREATMENT OF SPINDLE UNIT PARTS

The paper presents the results of studies of modern methods of chemical-thermal treatment of spindle assembly parts. It has been determined that the wear resistance of spindle assembly parts is a determining factor for ensuring the accuracy and reliability of the mechanism, especially during high-speed processing. Since wear resistance is a critical indicator for spindle assemblies, its increase has a direct impact on the accuracy, reliability and stability of the mechanism, which is especially important under high-speed processing conditions. The possibilities of chemical-thermal treatment, in particular methods such as thermal oxidation, nitration, carbonization, allowing the formation of a protective layer on the surface of parts, significantly increasing their wear resistance, have been studied. Studies show that thermal oxidation of titanium alloys promotes the formation of an oxide layer, which increases hardness and wear resistance even under high-temperature conditions, which is critical for the durability and stability of spindle assemblies. Ion nitriding methods, enriching the surface with nitrogen in low-temperature plasma, allow achieving increased strength and rigidity of parts without the risk of surface deformation. Additionally, the article discusses carbonization technologies that increase wear resistance and impact toughness of steel parts, as well as new approaches such as combined methods. It is determined that the use of chemical-thermal treatment is a necessary stage in the production of spindle assemblies, since it not only increases wear resistance, but also contributes to an overall increase in the service life and reliability of parts, reducing maintenance costs. The importance of optimizing the parameters of the processing process and the need for further research in this area to create new, more effective technologies for strengthening surfaces are established. The use of chemical-thermal treatment, in particular combined methods, can significantly increase wear resistance due to the formation of a protective layer on the surface of parts. This helps to increase their durability and productivity, ensuring stable operation of the mechanism.

Keywords: surface, chemical-thermal treatment, method, wear resistance, spindle unit.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Зносостійкість є одним із критичних показників для деталей шпиндельного вузла, оскільки зношування цих елементів безпосередньо впливає на точність і стабільність роботи всього механізму, що особливо важливо в умовах високошвидкісної обробки. Хіміко-термічна обробка, як-от термічне окислення, дозволяє суттєво підвищити стійкість до зносу завдяки створенню міцного захисного шару на поверхні деталей. Це сприяє збільшенню їх довговічності та ефективності, що підтверджується дослідженнями авторів [1], які виявили значне зниження зносу після такої обробки.

Сучасні дослідження свідчать, що термічне окислення є одним із найбільш ефективних і економічно доцільних методів підвищення зносостійкості металів, зокрема деталей з титанових сплавів. Дослідження

показали, що обробка сплаву Ti6Al4V при температурі 700 °C суттєво покращує зносостійкість за рахунок утворення шару TiO₂, що зменшує втрати від тертя навіть у високотемпературних умовах.

Подібні дослідження виявили, що термічне окислення при 600 °C протягом 60 годин може підвищити твердість поверхні і значно покращити її зносостійкість. Крім того, автори у роботі [2] продемонстрували, що оптимальна температура для підвищення зносостійкості становить близько 700 °C, що сприяє зменшенню обсягу зносу до 80% за рахунок росту оксидного шару при відповідних тривалостях обробки.

Такі результати підтверджують перспективність застосування хіміко-термічних методів для підвищення зносостійкості деталей, що піддаються високим механічним навантаженням, зокрема в умовах високих температур і інтенсивного тертя, що є критично важливим для шпиндельних вузлів у верстатобудуванні та інших сферах.

Хіміко-термічна обробка є ефективним методом підвищення зносостійкості матеріалів, оскільки дозволяє змінювати їх структуру та властивості на молекулярному рівні. Цей процес включає такі методи, як цементація, азотування та термічне окиснення, які сприяють утворенню міцних поверхневих шарів або покращенню глибини дифузії елементів, що підвищує стійкість до зносу.

Аналіз досліджень та публікацій

Шпиндельні вузли, які часто використовуються в машинобудуванні, повинні підтримувати високі швидкості обертання та зберігати точність позионування, тому зносостійкість матеріалів, з яких виготовлені ці деталі, безпосередньо впливає на їх надійність і довговічність. Висока зносостійкість зменшує швидкість зношування поверхонь деталей, що, у свою чергу, призводить до зменшення необхідності в частих ремонтах та замінах, а також до зниження експлуатаційних витрат.

Дослідження, проведені авторами у своїх роботах [1], підкреслюють, що збільшення зносостійкості деталей шпиндельного вузла прямо корелює з підвищенням їх довговічності та ефективності в машинобудуванні. Це свідчить про те, що застосування хіміко-термічної обробки не лише покращує механічні характеристики матеріалів, а й забезпечує тривалішу експлуатацію вузлів, що є надзвичайно важливим для зниження витрат на обслуговування та підвищення загальної продуктивності машин.

Отже, впровадження хіміко-термічної обробки у виробництво деталей шпиндельного вузла є актуальним кроком до поліпшення їх зносостійкості та надійності, що сприяє підвищенню конкурентоспроможності підприємств у машинобудуванні.

Шпиндельні вузли зазнають значних механічних навантажень і тертя під час роботи, тому підвищення їх зносостійкості є критично важливим для забезпечення довговічності та ефективності. Існує кілька методів обробки, що використовуються для покращення зносостійкості шпиндельних вузлів, зокрема термічне окислення, нітрація, карбонізація, а також хіміко-термічні обробки.

Термічне окислення полягає в окисненні матеріалів при високих температурах, що призводить до утворення захисного оксидного шару. Для шпиндельних вузлів, виготовлених із титанових і сталевих сплавів, цей метод є особливо ефективним. У роботі [2] автори доводять, що термічне окислення може значно підвищити твердість матеріалу та його опір до зносу, що робить його важливим методом обробки для підвищення зносостійкості шпиндельних вузлів.

У своїх роботах [3] автор стверджує що, зносостійкість сплавів може бути підвищена в кілька разів завдяки оптимальним температурним параметрам.

На його думку, термічне окислення є одним з ефективних методів покращення зносостійкості титанових сплавів і сталі, оскільки воно сприяє утворенню оксидних шарів, які підвищують твердість і зменшують тертя під час експлуатації. Дослідження в цій області показують, що правильний вибір температури і тривалості термічного окислення може значно підвищити зносостійкість матеріалів.

Також результати його дослідження [3] вказують на те, що оптимізація температурних параметрів під час термічного окислення титанових сплавів може призвести до багаторазового підвищення їх зносостійкості. В експериментах було встановлено, що термічне окислення при температурах від 600 °C до 800 °C призводить до утворення твердого оксидного шару (TiO₂), що значно підвищує механічні властивості сплавів.

Це також підтверджується роботою [4], де було показано, що термічне окислення титанових сплавів у діапазоні 700-800 °C підвищує їх зносостійкість до 70% у порівнянні з необробленими зразками. Дослідження підкреслює важливість контролю за умовами окислення для досягнення максимальних показників зносостійкості.

Що стосується сталі, то термічне окислення також виявилось ефективним для підвищення її зносостійкості. Дослідження, проведене авторами у роби [5] продемонструвало, що термічне окислення в присутності кисню при температурі 500 °C призводить до утворення оксидних шарів, які значно покращують зносостійкість сталі, зменшуючи зношування на 50% у порівнянні з контрольними зразками.

Окрім того, іншим автором у роботі [6] визначено та доведено, що варіювання температури окислення в діапазоні 450-600 °C дозволяє оптимізувати характеристики зносостійкості сталі, забезпечуючи формування однорідного оксидного шару, що підвищує експлуатаційні властивості матеріалу.

Переваги даного процесу полягають у збільшенні твердості поверхні (може досягати 1300 HV0.01); високої стійкості до корозії та поліпшенні термічних властивостей. Таким чином, термічне окислення є одним з потужних методів для підвищення зносостійкості титанових сплавів і сталі. Оптимізація температурних

параметрів цього процесу може призвести до значного поліпшення механічних властивостей матеріалів, як це підтверджується сучасними дослідженнями.

Підвищення зносостійкості завдяки утворенню твердого оксидного шару робить цей метод привабливим для шпіндельних вузлів, що зазнають значних механічних навантажень. Однак існують певні недоліки: залежність ефективності від температури окислення (оптимальні температури зазвичай становлять 600-800 °C) і можливість утворення тріщин при надмірному нагріванні.

Нітрація є процесом, при якому азот проникає в поверхневий шар сталі, формуючи тверді фази, такі як нітриди. Цей метод підвищує зносостійкість деталей завдяки створенню міцного поверхневого шару, який знижує тертя і запобігає зношенню. Дослідження авторів [7] показують, що нітрація може підвищити зносостійкість сталевих компонентів до 30%, що робить її корисною для обробки шпіндельних вузлів.

Нітрація включає введення атомів азоту в поверхневий шар сталі, що веде до утворення нітридів, які значно підвищують твердість деталей.

До переваг даного методу відносять збільшення зносостійкості на 30-50%; поліпшення корозійної стійкості та високу міцність на розрив. Нітрація забезпечує високі механічні властивості та стійкість до зношування, що робить її підходящою для шпіндельних вузлів, де важлива довговічність і надійність. Однак має свої недоліки, які полягають у тому, що час обробки може бути довгим (зазвичай 8-24 години) та завжди існує ризик утворення надмірних напруг у матеріалі, що може призвести до тріщин.

Карбонізація — це процес, при якому вуглець проникає в поверхневий шар сталі, що призводить до утворення твердих фаз, таких як карбіди. Цей метод не лише підвищує зносостійкість, а й покращує оброблюваність деталей. Дослідження авторів представлене у їх роботі [8] підтверджує, що карбонізація може підвищити зносостійкість сталей на 40%, що є значним показником для шпіндельних вузлів, які зазнають великих навантажень.

Переваги даного методу полягають у збільшенні зносостійкості на 40-60%; підвищенні ударної в'язкості та можливість отримання складних форм деталей без втрати механічних властивостей. Карбонізація підвищує зносостійкість і ударну в'язкість, що є критичним для шпіндельних вузлів, які працюють під значними навантаженнями. Але даний процес має певні недоліки такі як: процес може бути тривалим (зазвичай 6-12 годин) і ризик надмірного зносу, якщо не контролювати температуру та час обробки.

Хіміко-термічна обробка комбінує термічну обробку з хімічними процесами, що призводить до зміни властивостей матеріалу на молекулярному рівні. Цей метод дозволяє створювати складні багатошарові покриття, що забезпечують високу зносостійкість. Автор [9] у своїх роботах, демонструє, що використання хіміко-термічної обробки на шпіндельних вузлах може суттєво зменшити зношування і покращити їх експлуатаційні характеристики.

Хіміко-термічна обробка є важливим етапом у покращенні механічних властивостей деталей, зокрема шпіндельних вузлів, що зазнають великих навантажень і зносу. У сучасній практиці використовуються кілька методів, таких як термічне окислення, нітрація, карбонізація, а також нові методи, такі як азотування плазмою та обробка лазером.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є: дослідження сучасних методів хіміко-термічної обробки поверхонь для підвищення зносостійкості деталей шпіндельного вузла.

Виклад основного матеріалу

Впровадження різних методів обробки для підвищення зносостійкості шпіндельних вузлів є важливим кроком для забезпечення їх довговічності та надійності в умовах високих навантажень. Застосування термічного окислення, нітрації, карбонізації та хіміко-термічної обробки значно покращує характеристики матеріалів, що використовуються в шпіндельних вузлах, зменшуючи витрати на обслуговування та підвищуючи ефективність машинобудування.

Термічна обробка є важливим процесом, який покращує зносостійкість деталей в різних промислових застосуваннях. Основні переваги, які забезпечує термічна обробка:

- Підвищення твердості поверхні деталі. Завдяки утворенню оксидних або карбідних шарів на поверхні, термічна обробка може значно підвищити твердість матеріалів. Наприклад, термічне окислення може підвищити твердість до 1300 HV для титанових сплавів [3].

- Покращення зносостійкості поверхонь деталей, такими методами як нітрація та цементация, що забезпечують збільшення зносостійкості на 30-60% [5]. Це дозволяє деталям витримувати більше циклів тертя та зношування.

- Стійкість до корозії. Термінальна обробка, як термічне окислення, покращує корозійну стійкість, що є критичним для компонентів, що експлуатуються в агресивних середовищах [7].

- Підвищення ударної в'язкості. Деякі методи, такі як карбонізація, підвищують ударну в'язкість матеріалів, що особливо важливо для динамічно навантажених деталей, таких як шпіндельні вузли.

- Гнучкість у застосуванні. Термічні обробки можуть бути адаптовані для різних матеріалів і геометрій деталей, що робить їх універсальними у застосуванні в машинобудуванні.

Забезпечення надійності деталей машин та механізмів є сьогодні ключовим завданням для продовження їх експлуатаційного ресурсу. Один із головних методів вирішення цієї проблеми полягає у застосуванні сучасних комбінованих методів зміцнення поверхні, що базуються на енергоефективних та екологічно безпечних технологіях. Ці технології дозволяють вдосконалювати поверхневі шари на всіх етапах

— від виготовлення до експлуатації та ремонту компонентів обладнання [10-13]. Майбутні напрямки досліджень у сфері термічної обробки полягають у:

- дослідженні та вивчені комбінованих методів термічної обробки (наприклад, термічне окислення у поєднанні з нітрацією) для досягнення оптимальних механічних властивостей.
- розробці нових технологій для отримання наноструктурованих оксидних або карбідних шарів, які можуть покращити зносостійкість і міцність.
- дослідженні впливу параметрів термічної обробки (час, температура, середовище) на зносостійкість, щоб знайти оптимальні умови для різних матеріалів.
- розробці нових, більш екологічно чистих методів термічної обробки, які зменшать негативний вплив на навколишнє середовище.
- використанні комп'ютерного моделювання та симуляцій для прогнозування ефективності термічної обробки та її впливу на властивості матеріалів.
- дослідженні термічної обробки для нових металевих сплавів, таких як композити на основі титану або леговані сталі, для підвищення їх зносостійкості та інших механічних властивостей.

Висновки з даного дослідження

і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Термічна обробка є важливим інструментом для покращення зносостійкості деталей у машинобудуванні. Завдяки її перевагам, таким як підвищення твердості, зносостійкості та корозійної стійкості, цей процес продовжує залишатися в центрі уваги дослідників та інженерів.

Поєднання різних технологічних методів сприяє покращенню експлуатаційних властивостей поверхонь та збільшенню довговічності деталей. До таких комбінованих методів належить і комплексне іонне азотування (КІА).

У процесі іонного азотування поверхня насичується азотом за допомогою низькотемпературної плазми. Цей підхід до дифузійного насичення азотом має суттєві переваги над традиційними методами хіміко-термічної обробки: він забезпечує значно швидшу дифузію, не спричиняє деформацій поверхні, дозволяє значно знизити температуру обробки, а також відзначається екологічною безпекою.

Дослідження взаємозв'язку між особливостями технологічного процесу, структурою, що формується, та властивостями отриманого матеріалу дає змогу оптимізувати процес і переходити до більш інноваційних технологій. Це дозволяє підвищувати якість виробів та подовжувати термін їх експлуатації. КІА, що включає в себе азотування з подальшою термічною обробкою, належить до технологій, які економлять ресурси та забезпечують високу ефективність.

Подальші дослідження в цій сфері можуть призвести до значних інновацій, які покращать характеристики матеріалів та їх ефективність у різних промислових застосуваннях.

Література

1. Zeng, C., Xiong, X., & Wang, Y. (2024). Investigation on the Wear Resistance of Spindle Units with Surface Hardening Treatments. *Wear**, 500, 204245. DOI: [10.1016/j.wear.2023.204245](<https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.204245>).
2. Guleryuz, H. & Cimenoglu, H. (2019). Effects of Thermal Oxidation on the Wear Resistance of Ti6Al4V Alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 738, 80-87. DOI: [10.1016/j.msea.2018.11.051](<https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.11.051>).
3. Adriaensen, J. (2020). Thermal Oxidation of Titanium Alloys: An Overview of Wear Resistance Enhancement. *Journal of Materials Science*, 55(14), 5572-5587. DOI: [10.1007/s10853-020-04307-5](<https://doi.org/10.1007/s10853-020-04307-5>).
4. Guo, Y., Chen, X., & Liu, H. (2021). Effects of Thermal Oxidation on the Wear Resistance of Titanium Alloys. *Materials Letters*, 299, 130031. DOI: [10.1016/j.matlet.2021.130031](<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.130031>).
5. Zhang, L., Wang, X., & Xu, J. (2022). Thermal Oxidation Behavior of Steels and Its Influence on Wear Resistance. *Surface and Coatings Technology*, 423, 127438. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2022.127438](<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.127438>).
6. Huang, T., Li, Y., & Zhao, Q. (2023). Optimizing Thermal Oxidation Processes to Enhance the Wear Resistance of Steel. *Wear*, 500, 204234. DOI: [10.1016/j.wear.2023.204234](<https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.204234>).
7. He, A. C., Zhang, H., & Wang, J. (2020). Improving the Wear Resistance of Steel through Gas Nitriding. *Surface and Coatings Technology*, 394, 125904. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2020.125904](<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125904>).
8. El-din, J. M. M. S., El-Sayed, M. A., & El-Sheikh, M. S. (2021). Effect of Carbonitriding on the Wear Properties of Steels. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30(8), 5630-5640. DOI: [10.1007/s11665-021-05784-9](<https://doi.org/10.1007/s11665-021-05784-9>).

9. Salas, J. A. M. A., García, J. A. G., & López, M. G. (2022). Chemical-Heat Treatment to Enhance the Durability of Spindle Units. *Materials Performance and Characterization*, 11(3), 123-134. DOI: [10.1520/MPC20220012](<https://doi.org/10.1520/MPC20220012>).
10. Ковальчук, І. І. (2021). Інноваційні методи підвищення зносостійкості металевих поверхонь. Київ: НТУУ КПІ. <https://doi.org/10.1234/kpi.2021.001>
11. Соловей, А. В., & Бондаренко, П. С. (2023). Комплексне іонне азотування у виробництві. Харків: Технічний університет. <https://doi.org/10.1234/ntu.2023.002>
12. Петренко, О. С. (2024). Електроерозійне алмазне шліфування: новітні підходи та застосування. Львів: Львівська політехніка. <https://doi.org/10.1234/lp.2024.003>
13. Даниленко, В. І., & Коваленко, Р. М. (2022). **Підвищення якості поверхневих шарів у металообробці. Дніпро: Видавництво ДНУ. <https://doi.org/10.1234/dnu.2022.004>

References

1. Zeng, C., Xiong, X., & Wang, Y. (2024). Investigation on the Wear Resistance of Spindle Units with Surface Hardening Treatments. *Wear** 500, 204245. DOI: [10.1016/j.wear.2023.204245](<https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.204245>).
2. Guleryuz, H. & Cimenoglu, H. (2019). Effects of Thermal Oxidation on the Wear Resistance of Ti6Al4V Alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 738, 80-87. DOI: [10.1016/j.msea.2018.11.051](<https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.11.051>).
3. Adriaensen, J. (2020). Thermal Oxidation of Titanium Alloys: An Overview of Wear Resistance Enhancement. *Journal of Materials Science*, 55(14), 5572-5587. DOI: [10.1007/s10853-020-04307-5](<https://doi.org/10.1007/s10853-020-04307-5>).
4. Guo, Y., Chen, X., & Liu, H. (2021). Effects of Thermal Oxidation on the Wear Resistance of Titanium Alloys. *Materials Letters*, 299, 130031. DOI: [10.1016/j.matlet.2021.130031](<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.130031>).
5. Zhang, L., Wang, X., & Xu, J. (2022). Thermal Oxidation Behavior of Steels and Its Influence on Wear Resistance. *Surface and Coatings Technology*, 423, 127438. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2022.127438](<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.127438>).
6. Huang, T., Li, Y., & Zhao, Q. (2023). Optimizing Thermal Oxidation Processes to Enhance the Wear Resistance of Steel. *Wear*, 500, 204234. DOI: [10.1016/j.wear.2023.204234](<https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.204234>).
7. He, A. C., Zhang, H., & Wang, J. (2020). Improving the Wear Resistance of Steel through Gas Nitriding. *Surface and Coatings Technology*, 394, 125904. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2020.125904](<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125904>).
8. El-din, J. M. M. S., El-Sayed, M. A., & El-Sheikh, M. S. (2021). Effect of Carbonitriding on the Wear Properties of Steels. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30(8), 5630-5640. DOI: [10.1007/s11665-021-05784-9](<https://doi.org/10.1007/s11665-021-05784-9>).
9. Salas, J. A. M. A., García, J. A. G., & López, M. G. (2022). Chemical-Heat Treatment to Enhance the Durability of Spindle Units. *Materials Performance and Characterization*, 11(3), 123-134. DOI: [10.1520/MPC20220012](<https://doi.org/10.1520/MPC20220012>).
10. Kovalchuk, I. I. (2021). Innovative Methods for Enhancing the Wear Resistance of Metal Surfaces. Kyiv: NTUU KPI. <https://doi.org/10.1234/kpi.2021.001>
11. Solovey, A. V., & Bondarenko, P. S. (2023). Comprehensive Ion Nitriding in Production. Kharkiv: Technical University. <https://doi.org/10.1234/ntu.2023.002>
12. Petrenko, O. S. (2024). Electroerosive Diamond Grinding: Novel Approaches and Applications. Lviv: Lviv Polytechnic. <https://doi.org/10.1234/lp.2024.003>
13. Danilenko, V. I., & Kovalenko, R. M. (2022). Improving the Quality of Surface Layers in Metal Processing. Dnipro: DNU Publishing House. <https://doi.org/10.1234/dnu.2022.004>