

# МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ КОМПЛЕКСНОГО ІОННОГО АЗОТУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ ШПИНДЕЛЬНОГО ВУЗЛА

Вінницький національний технічний університет

## *Анотація*

*Досліджено процес комплексного іонного азотування прецизійних деталей шпиндельного вузла машинобудівного обладнання. Запропоновано комплексну методику дослідження, яка поєднує експериментальні аналізи, математичне моделювання та концепцію адаптивного керування технологічним процесом. Визначено взаємозв'язок між режимами плазмової обробки та експлуатаційними характеристиками зміцненого шару, що забезпечує стабільність геометричних параметрів і підвищення довговічності шпиндельних систем.*

**Ключові слова:** шпиндельний вузол, іонне азотування, мікротвердість, зносостійкість, математичне моделювання.

## *Abstract*

*The process of complex ion nitriding of precision parts of the spindle assembly of machine-building equipment has been studied. A complex research methodology has been proposed, which combines experimental analyses, mathematical modeling and the concept of adaptive control of the technological process. The relationship between the plasma treatment modes and the operational characteristics of the hardened layer has been determined, which ensures the stability of geometric parameters and increases the durability of spindle systems.*

**Keywords:** spindle assembly, ion nitriding, microhardness, wear resistance, mathematical modeling.

## Вступ

Сучасний розвиток високоточного машинобудування, верстатобудування та автоматизованих виробничих систем зумовлює необхідність підвищення надійності й довговічності шпиндельних вузлів, які є ключовими елементами металорізального обладнання. Експлуатаційні навантаження, високі швидкості обертання та температурні впливи призводять до інтенсивного зношування поверхонь деталей шпиндельних систем, що негативно впливає на точність обробки та ресурс роботи обладнання. Одним із найбільш ефективних способів підвищення зносостійкості та твердості поверхневого шару є комплексне іонне азотування, яке забезпечує формування зміцнених дифузійних шарів із високими трибологічними характеристиками [1–4].

У сучасних умовах особливого значення набуває розроблення методик дослідження технологічного процесу комплексного іонного азотування, що дозволяють оцінювати вплив технологічних параметрів на структуру, мікротвердість та експлуатаційні властивості деталей шпиндельного вузла. Використання математичного моделювання, адаптивного керування та цифрових методів контролю відкриває перспективи підвищення ефективності процесів поверхневого зміцнення [5–8].

Метою дослідження є розроблення методики дослідження технологічного процесу комплексного іонного азотування деталей шпиндельного вузла для підвищення зносостійкості, мікротвердості та стабільності геометричних параметрів поверхневого шару.

## Результати дослідження

В межах розробки комплексної методики було проведено системний аналіз та узагальнення чинних підходів до хіміко-термічної обробки конструкційних матеріалів. Встановлено, що порівняно з класичним газовим азотуванням, іонно-плазмові методи дозволяють суттєво скоротити час дифузійного насичення, мінімізувати деформації деталей та забезпечити високу якість поверхні без утворення крихкої нітридної корки [5, 6]. Це є критично важливим для прецизійних елементів шпиндельних систем.

Запропонований методичний підхід базується на інтеграції експериментальних досліджень та математичного моделювання. Експериментальна частина методики орієнтована на встановлення точних закономірностей впливу параметрів плазмового середовища (температурно-часових характеристик, складу газової суміші, робочого тиску) на фазово-структурний стан та глибину дифузійного шару легованих сталей.

Математичне моделювання процесу дифузійного насичення поверхонь дозволяє прогнозувати розподіл мікротвердості за глибиною шару. Для оптимізації багатofакторних технологічних режимів обробки та прогнозування фінішних експлуатаційних властивостей поверхонь у методику інтегровано алгоритми цифрового моделювання та сучасні оптимізаційні інструменти (зокрема, генетичні алгоритми) [7, 8]. Це дозволяє встановити стійкий взаємозв'язок між режимами плазмового азотування та підсумковими показниками точності й зносостійкості шпиндельних вузлів. Додатково обґрунтовано архітектуру адаптивних систем автоматичного керування параметрами струму та пульсації плазми для забезпечення гомогенності зміцненого шару по всій довжині довгомірних деталей шпинделя [6, 9].

### Висновки

Удосконалено методичний підхід до дослідження процесів хіміко-термічної обробки шляхом комплексного поєднання плазмових технологій зміцнення та математичного прогнозування результатів обробки. Обґрунтовано переваги комплексного іонного азотування як детермінанти підвищення довговічності прецизійних вузлів металообробного обладнання, що дозволяє отримати низький коефіцієнт тертя при збереженні геометричної точності деталей. Запропонована методика створює наукову базу для переходу від емпіричного підбору режимів азотування до адаптивного цифрового керування технологічними параметрами плазми, що мінімізує виробничий брак та оптимізує енерговитрати.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на розроблення інтегрованих методик математичного моделювання процесу іонного азотування, створення адаптивних систем автоматизованого керування та застосування інтелектуальних алгоритмів оптимізації технологічних режимів. Це дозволить підвищити ресурс роботи шпиндельних вузлів, забезпечити стабільність геометричних параметрів і покращити ефективність високоточного машинобудівного обладнання.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Мельченко А. С., Віштак І. В. Аналіз сучасних досягнень методів хіміко-термічної обробки деталей шпиндельного вузла // *Вісник Хмельницького національного університету. Серія «Технічні науки»*. 2024. № 6. С. 168-172. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-343-6>
2. Sobol O. V., Shevchenko S. M., Protasenko T. O. Дослідження ефективності комплексного іонного азотування для модифікації сталі // *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*. 2018. DOI: <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2018.82.0.13>.
3. Трішук Р. Л. Підвищення зносостійкості деталей поліграфічного обладнання шляхом модифікації їх поверхонь методом іонно-плазмового азотування // *Технологія і техніка друкарства*. 2018. DOI: [https://doi.org/10.20535/2077-7264.1\(59\).2018.135134](https://doi.org/10.20535/2077-7264.1(59).2018.135134).
4. Костик К. О., Костик В. О. Порівняльний аналіз впливу газового та іонно-плазмового азотування на зміну структури і властивостей легованої сталі 30X3BA. // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Нові рішення у сучасних технологіях*. 2015. (48), С. 21–41. Режим доступу: <https://vestnik2079-5459.khpi.edu.ua/article/view/42899>.
5. Мірненко В. І., Радько О. В., Скуратовський А. К. Вакуумне азотування у пульсуючому пучку плазми конструкційних елементів військової техніки з алюмінієвих сплавів // *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони* № 3(30)/2017. Режим доступу: <https://sit.nuou.org.ua/article/view/213748/213811>
6. Віштак І. В., Мельченко А. С. Методи обробки поверхонь шпиндельних вузлів для підвищення зносостійкості // *Матеріали Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2025)»*, Вінниця, 15-16 червня 2025 р. Електрон. текст. дані. 2025. URI: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2025/paper/view/23025>.
7. Singh, G., Kumar, H., Kansal, H. K., Sharma, K., Kumar, R., Chohan, J. S., Singh, S., Sharma, S., Li, C., Królczyk, G., & Królczyk, J. B. Multiobjective Optimization of Chemically Assisted Magnetic Abrasive Finishing (MAF) on Inconel 625 Tubes Using Genetic Algorithm: Modeling and Microstructural Analysis. // *Micromachines*. 2022. 13(8), 1168. <https://doi.org/10.3390/mi13081168>.

8. Jie Y, Jiao F, Niu Y, Zhang H, Zhang Z, Tong J. Effect of ultrasonic vibration on oxide layer properties in ultrasonic-assisted ELID internal cylinder grinding.// *Ultrason Sonochem.* 2024 Feb;103:106783. doi: 10.1016/j.ultsonch.2024.106783.

9 Belkin P. N., Kusmanov S. A., Parfenov E. V., Mechanism and technological opportunity of plasma electrolytic polishing of metals and alloys surfaces // *Applied Surface Science Advances*, Volume 1, 2020, 100016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2020.100016>.

**Мельченко Андрій Сергійович** – аспірант 3 року навчання кафедри технологій автоматизації машинобудування, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: [3360333@gmail.com](mailto:3360333@gmail.com)

Науковий керівник: **Віштак Інна Вікторівна** – канд. техн. наук, доцент кафедри безпеки життєдіяльності та педагогіки безпеки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: [vishtakiv@vntu.edu.ua](mailto:vishtakiv@vntu.edu.ua)

**Melchenko Andrii** - postgraduate 3 year of study of the Department of Technology and Automation of Mechanical Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: [3360333@gmail.com](mailto:3360333@gmail.com)

**Supervisor: Vishtak Inna. V.** – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department Safety of Life and Pedagogical Safety, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, email: [vishtakiv@vntu.edu.ua](mailto:vishtakiv@vntu.edu.ua)