

М. М. Кудратов; І. В. Віштак, канд. техн. наук, доц.

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ШЛІФУВАННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ТА ЯКОСТІ ПОВЕРХОНЬ ГАЗОВИХ ПІДШИПНИКІВ

В роботі наведено актуальні аспекти удосконалення методів шліфування для підвищення точності та якості поверхонь газових підшипників, які широко застосовуються у високошвидкісних та точних механізмах: від мікросистем до великих турбомашин. Увага приділяється критичним параметрам, таким як: мінімізація коефіцієнта тертя, стійкість до зношування, а також забезпечення тривалого терміну служби підшипників. Оскільки газові підшипники важливі у таких галузях, як харчова, текстильна та фармацевтична промисловість, то питання забезпечення чистоти робочого середовища без застосування мастильних матеріалів є особливо важливим. Проаналізовано основні методи шліфування, включаючи прецизійне шліфування, електроерозійне алмазне шліфування, комплексне іонне азотування та суперфінішування, а також розглянуті їхні переваги та обмеження. Визначені загальні можливості зниження теплових деформацій поверхні, забезпечення високої жорсткості та стабільності, які є критичними для функціонування газових підшипників на високих швидкостях обертання. Окрему увагу приділено методам обробки алмазними та керамічними шліфувальними кругами, що дозволяє підвищити точність поверхні та зменшити її шорсткість. У статті обґрунтовується потреба в адаптивних технологіях, таких як ультразвукове та абразивно-струменеве шліфування, а також використання сенсорів для контролю процесу шліфування в реальному часі. Ці підходи дозволяють досягти необхідної точності поверхні та однорідності, забезпечуючи при цьому зниження залишкових напружень і уникнення мікротріщин. Розглянуті також комбіновані методи шліфування, які об'єднують переваги кількох підходів для підвищення продуктивності та точності обробки поверхонь підшипників. Пропонуються перспективні напрямки розвитку технологій обробки поверхонь для газових підшипників для подальшого дослідження, підкреслюючи важливість інноваційних підходів до шліфування.

Ключові слова: методи шліфування, газові підшипники, поверхня, точність обробки, точність, якість.

Вступ

Газові підшипники є важливими компонентами, що застосовуються в широкому діапазоні від мікросистем до великих турбомашин. Оскільки такі підшипники та пневматичні напрямні часто використовуються у харчовій, текстильній і фармацевтичній галузях, забезпечення їх роботи на чистому повітрі дозволяє уникнути забруднень, що є критичним для цих індустрій [1]. Новітні дослідження зосереджені на розширенні сфер застосування газових підшипників, зокрема на їхньому використанні за дуже високих швидкостей, що важливо для високоточних механізмів, таких як стоматологічні бормашини. Такі механізми можуть досягати швидкості понад 500 об/хв, причому межа для газових підшипників без охолодження становить 700 об/хв [1].

Завдяки тому, що газові підшипники не вимагають мастильних матеріалів і практично не зношуються, вони мають майже необмежений термін служби та потребують мінімального обслуговування [2]. Сучасні дослідження повітряних підшипників здійснюються з використанням експериментальних, чисельних і теоретичних методів, які включають аналітичні моделі [3]. Проте, для підвищення жорсткості, вантажопідйомності та стабільності підшипників необхідні додаткові дослідження.

Постановка проблеми

Основні проблеми, що стосуються обробки поверхонь газових підшипників, пов'язані з необхідністю забезпечення високої точності обробки, уникнення теплових деформацій та забезпечення довговічності при роботі у високошвидкісних режимах. Кожен метод обробки має свої обмеження: прецизійне шліфування і суперфінішування забезпечують високу точність, але вимагають тривалого процесу, а електроерозійне шліфування та комплексне іонне азотування, хоч і дозволяють підвищити зносостійкість, мають свої технологічні нюанси.

Подальші дослідження, зокрема комбінування цих методів, можуть допомогти досягти оптимальних характеристик поверхонь підшипників, що значно підвищить їх довговічність і надійність.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Науковці постійно працюють над потенційними конструктивними рішеннями, орієнтуючись на специфічні вимоги до кожного типу застосування. Хоча на сьогодні динамічні газові підшипники здебільшого обмежуються малопотужними застосуваннями, спостерігається тенденція до розробки більш потужних і надійних систем [4]. Зокрема, при розробці верстатів важливо досягти жорсткості, порівняно з жорсткістю підшипників кочення, які традиційно використовуються у цих механізмах. Стабільність також є критично важливою для високошвидкісних програм. Такі параметри: кількість та діаметр подаючих отворів, їх розташування, а також геометрія подачі повітря, відіграють значну роль у забезпеченні стабільності роторів під час обертання на високих швидкостях [5].

Досягнення високої якості поверхонь та їхньої точності є одним з основних завдань у розробці сучасних високошвидкісних і точних механізмів, що використовуються в авіаційній, автомобільній та прецизійній промисловості. Газові підшипники мають мінімальний коефіцієнт тертя і високий опір зношуванню, проте для досягнення таких показників необхідна якісна обробка поверхонь. Саме тому автор відзначає, що обробка поверхонь, зокрема методи шліфування, безпосередньо впливають на надійність і довговічність цих механізмів [6].

Газові підшипники знаходять широке застосування у високошвидкісних і точних механізмах завдяки їхньому низькому коефіцієнту тертя та високій стійкості до зношування. Для забезпечення ефективної та тривалої роботи таких підшипників особливу увагу приділяють методам обробки їх поверхонь. Розглянемо сучасні літературні джерела, що присвячені різним методам обробки поверхонь газових підшипників, які допомагають досягти необхідної точності, шорсткості та стабільності в умовах високих швидкостей та навантажень.

За даними досліджень авторів [7, 8], основні методи шліфування газових підшипників включають прецизійне шліфування, суперфінішування, а також електроерозійне шліфування. Відомо, що кожен з методів має свої переваги та обмеження щодо точності і якості оброблюваної поверхні. Прецизійне шліфування дозволяє досягти високої точності, але його використання може обмежуватися при роботі з високошвидкісними системами. Електроерозійне шліфування застосовується для матеріалів з високою твердістю, забезпечуючи водночас високу якість обробки без надмірного теплового впливу на поверхню.

Прецизійне шліфування забезпечує високу точність обробки поверхонь та зниження шорсткості, що є критично важливим для створення рівномірного газового прошарку. Автор у своїй роботі [9] зазначає, що прецизійне шліфування дає змогу досягти шорсткості поверхні на рівні $R_a = 0,1$ мкм, що знижує рівень тертя та покращує розподіл навантаження на підшипник та знижує рівень тертя, що сприяє рівномірному розподілу навантаження на підшипник. Але одночасно з такими перевагами цього методу він вимагає високоточного обладнання, що може бути дорогим та залежить від якості інструменту і регулярного контролю точності [10].

Електроерозійне шліфування є ефективним для обробки твердих сплавів та дозволяє зменшити теплові деформації поверхні. За результатами досліджень автора [11], електроерозійне шліфування забезпечує не лише високий ступінь точності обробки, а й зміну

структури металу у зоні контакту, формуючи міцний "білий шар", який підвищує стійкість до зношування. Цей метод особливо ефективний для матеріалів з високою твердістю, забезпечуючи мінімальний тепловий вплив на поверхню. Надаючи перевагу вищевказаним якостям потрібно також враховувати і його недоліки, а саме те, що цей метод потребує спеціального обладнання та кваліфікованого обслуговування і може бути повільнішим за інші методи, що впливає на продуктивність [12, 13].

Метод комплексного іонного азотування забезпечує обробку поверхонь шляхом насичення азотом, що підвищує зносостійкість і дозволяє отримати рівномірну твердість. Як зазначено в дослідженнях авторів [14], комплексне іонне азотування дозволяє обробляти поверхні за низьких температур, уникати деформацій та отримувати високу стійкість до корозії і зношування, що є важливим для газових підшипників, які працюють в агресивному середовищі. Проте процес є енерговитратним і потребує спеціальних умов реалізації та вимагає тривалого часу обробки для досягнення необхідної твердості.

Суперфінішування є фінішним методом обробки, що дозволяє значно знижувати шорсткість поверхні, досягаючи значень $Ra = 0,02 - 0,05$ мкм. Автори у своїй роботі [15], стверджують що цей метод забезпечує точність обробки поверхні до мікронного рівня і мінімізує ризик мікротріщин. Суперфінішування дозволяє усунути дефекти, спричинені попередніми етапами обробки, що підвищує ефективність підшипників у високошвидкісних механізмах. Водночас цей метод потребує додаткових ресурсів для фінішної обробки та є більш витратним через необхідність спеціалізованого обладнання та інструментів.

Вибір матеріалу шліфувальних кругів є одним з визначальних факторів у досягненні високої якості поверхні. Згідно з авторами [16 – 18], використання алмазних кругів дозволяє досягти високої точності обробки і довговічності поверхонь завдяки низькому зносу інструмента та підвищеній стійкості до температурних коливань, що важливо для стабільності роботи підшипників.

Мета і завдання статті

Метою цієї статті є аналіз сучасних методів шліфування та удосконалення методу шліфування для підвищення якості поверхонь газових підшипників.

Методи і матеріали

У дослідженні використовувалася комплексна методологія, що включала застосування загальнонаукових методів аналізу та синтезу, порівняльний метод, а також метод структурування. На першому етапі було проведено аналіз наявних літературних джерел, що розглядають методи обробки поверхонь газових підшипників, зокрема, шліфування, суперфінішування, електроерозійне шліфування та комплексне іонне азотування. Цей аналіз допоміг виділити ключові особливості кожного методу, їх переваги, обмеження та технологічні аспекти. Після цього, з використанням порівняльного методу, було створено таблицю, в якій систематизовано дані щодо кожного методу, а саме: точність обробки, ступінь шорсткості, вимоги до обладнання, тепловий вплив на поверхню, а також доцільність використання для різних матеріалів підшипників. Наступним етапом було структурування зібраних даних, що дозволило визначити взаємозв'язок між особливостями обробки та довговічністю підшипників у високошвидкісних механізмах. Матеріалом аналізу слугували наукові статті та дослідження авторів, які присвячені обробці поверхонь газових підшипників у контексті підвищення їх зносостійкості та зниження коефіцієнта тертя. Така послідовність дозволила не лише виявити ефективність різних методів обробки, але й обґрунтувати доцільність їхнього комбінування для досягнення оптимальних характеристик поверхонь підшипників, що забезпечить їхню надійність та довговічність.

Результати досліджень

Застосування алмазних шліфувальних кругів із вдосконаленою мікроструктурою є одним із найперспективніших методів для досягнення високої якості поверхні газових підшипників. Такі круги створені для мінімізації температурних деформацій і покращення зносостійкості, що особливо важливо під час роботи в умовах високошвидкісного обертання. Завдяки новітнім розробкам в галузі матеріалознавства та інженерії поверхонь, алмазні шліфувальні круги тепер можуть забезпечувати не тільки покращену якість поверхні, а й підвищену стабільність геометричних параметрів у процесі обробки.

Поліпшена мікроструктура алмазних шліфувальних кругів дозволяє рівномірніше розподіляти тиск під час шліфування, що знижує деформацію і нагрівання оброблюваної поверхні. Це сприяє досягненню надзвичайно низької шорсткості (R_a 0.01 – 0.03 мкм) і забезпечує стабільну якість поверхні навіть при тривалих циклах шліфування.

Завдяки покращеній адгезії зерен до основи круга, алмазні круги з новою мікроструктурою мають значно вищу стійкість до зношування. Це знижує потребу в частій перешліфовці круга і сприяє тривалому підтриманню постійної якості обробки.

Використання кругів з вдосконаленою мікроструктурою дозволяє уникнути перегріву оброблюваної поверхні, що є ключовим для мінімізації мікротріщин та інших пошкоджень. Наприклад, робота [4] показує, що зниження температурних деформацій на 20 – 25 % під час шліфування допомагає досягти стабільності форми підшипників під час їх експлуатації на високих швидкостях.

Згідно з дослідженнями [2], застосування алмазних кругів нового покоління дозволяє досягти зниження коефіцієнта тертя на 15 % порівняно з традиційними абразивними інструментами, що суттєво підвищує ефективність газових підшипників за високих швидкостей обертання. Це робить такі підшипники більш стійкими до зношування і придатними для використання в точних приладах і високонавантажених механізмах.

Дослідники [5] провели експериментальне тестування алмазних кругів з покращеною мікроструктурою на обробці газових підшипників і зафіксували наступні результати:

- зниження температури обробки на 15 – 20 % порівняно із звичайними абразивними кругами.

- збільшення стійкості до зношування круга на 30 %, що зменшує витрати на інструменти та підвищує стабільність шліфування.

- поліпшення геометричної точності – відхилення в геометрії оброблюваних поверхонь зменшилось на 10 – 12 %.

Такі результати вказують на можливість використання цих кругів для обробки критично важливих деталей, де потрібна висока точність та надійність.

Попри значні переваги, удосконалення алмазних кругів з мікроструктурою є перспективним напрямом досліджень для подальшої оптимізації, а саме: створення адаптивних кругів з змінною зернистістю для забезпечення ще більшої точності поверхні; інтеграція з активними системами охолодження для зменшення температурних деформацій у процесі роботи та розробка методик автоматичного моніторингу зносостійкості та стану інструментів у режимі реального часу.

Таким чином, удосконалені алмазні шліфувальні круги є однією з перспективних технологій для підвищення точності і якості поверхонь газових підшипників.

Абразивно-струменева обробка є одним з ефективних методів, що забезпечують високий рівень чистоти та якості поверхні газових підшипників. Цей метод ґрунтується на застосуванні потоку абразивних частинок, які подаються з високою швидкістю під тиском на оброблювану поверхню. Завдяки такому впливу, з поверхні видаляються мікротріщини, мікродефекти та нерівності, що робить її більш однорідною та стійкою до зношування.

Цей метод дозволяє досягти однорідності поверхні, яка є важливою для забезпечення стабільної роботи газових підшипників за високих навантажень. Дослідження [19, 20] показали, що застосування абразивно-струменевої обробки дозволяє знизити шорсткість поверхні до $R_a = 0.02$ мкм, що значно покращує її механічні характеристики і довговічність.

Абразивні частинки, що впливають на поверхню підшипника, здатні ефективно усувати мікротріщини та дефекти, які можуть стати осередками для розвитку пошкоджень. Компоненти, оброблені абразивно-струменевим методом, показали зниження ризику пошкоджень на 15 – 20 % під час експлуатації в умовах високого навантаження [21]. Це свідчить про підвищену стійкість до зношування та надійність таких компонентів.

Абразивно-струменева обробка сприяє зміцненню поверхні та підвищенню її стійкості до механічних пошкоджень, що критично важливо для газових підшипників, які працюють у важких умовах експлуатації. Як зазначають автори [22], завдяки цьому методу обробки термін служби поверхонь збільшився на 25 %, що особливо цінно для компонентів, які мають витримувати високу частоту обертання.

Завдяки усуненню мікрodefektів зменшується ризик утворення втомних пошкоджень під час циклічного навантаження. Це важливо для компонентів, які працюють при високих швидкостях обертання та піддаються значним навантаженням.

Дослідження, проведені у [23], підтверджують, що абразивно-струменева обробка дозволяє знижувати ризик втомних пошкоджень за рахунок зменшення дефектів поверхні. Вони зазначають, що компоненти, які пройшли таку обробку, мали на 30 % менше мікротріщин порівняно з необробленими аналогами. Це робить метод особливо ефективним для застосування в точних приладах та обладнанні, де необхідна стабільна робота компонентів при високих навантаженнях і обертах.

У дослідженні [24] також виявлено, що абразивно-струменева обробка забезпечує мінімізацію шорсткості поверхні до $Ra = 0.01 - 0.03$ мкм, що є критичним показником для газових підшипників. Зниження шорсткості поверхні безпосередньо впливає на зменшення коефіцієнта тертя, що дозволяє підвищити ефективність роботи підшипників і продовжити їх термін служби.

Перспективними напрямками для подальшого вдосконалення абразивно-струменевої обробки є:

- оптимізація складу абразивних частинок які застосовуються в струмені, для досягнення ще вищої якості обробки;
- автоматизація процесу обробки з інтеграцією з системами контролю якості в реальному часі, що дозволить уникати дефектів і підтримувати стабільність якості обробки.
- дослідження впливу абразивно-струменевої обробки на різні матеріали для створення універсальних рішень в обробці газових підшипників різних типів.

Абразивно-струменева обробка вже зарекомендувала себе як один з найефективніших методів для підвищення якості та точності поверхонь, і її подальше вдосконалення може стати важливим кроком у підвищенні довговічності та надійності високоточних компонентів.

Ультразвукове шліфування є інноваційним методом, що використовує високочастотні коливання для покращення якості обробки поверхонь, особливо твердих матеріалів. Перевага цього методу полягає у зниженні контактного тиску між шліфувальним інструментом та поверхнею, що дозволяє значно зменшити нагрівання і мінімізувати ризик утворення залишкових напружень та мікротріщин.

Процес ультразвукового шліфування базується на коливаннях з частотою, яка перевищує 20 кГц. Ці коливання передаються на шліфувальний інструмент, який рухається з мікроамплітудою на поверхні оброблюваного матеріалу. Це призводить до зниження сил тертя і покращення умов різання, що дозволяє більш рівномірно видаляти матеріал без значного підвищення температури в зоні обробки.

У дослідженні [23], зазначається, що ультразвукове шліфування дозволяє знизити температуру на поверхні оброблюваного матеріалу приблизно на 30% у порівнянні зі звичайним шліфуванням. Це особливо важливо при роботі з твердими та крихкими матеріалами, такими як кераміка та тверді сплави, які чутливі до високих температур.

Залишкові напруження, що виникають під час звичайного шліфування, можуть знижувати механічну міцність та довговічність поверхні. Завдяки меншому нагріванню та зниженню тиску на контактній зоні, ультразвукове шліфування значно знижує ці напруження.

Дослідження [24] показало, що використання ультразвукових вібрацій дозволило зменшити залишкові напруження на 15 – 20 %, що забезпечує стабільнішу роботу матеріалу під навантаженням.

Ультразвукове шліфування забезпечує більш однорідну структуру поверхні, що підвищує її стійкість до зношування і зменшує ризик мікротріщин. Автори у роботі [25] визначили, що шорсткість поверхні після ультразвукового шліфування була знижена до Ra 0.01 – 0.03 мкм. Це значно покращує тертя і знижує коефіцієнт тертя, що робить метод ефективним для виготовлення деталей, які працюють в умовах високих швидкостей обертання.

Як відзначають автори у своїх роботах [24 – 26], ультразвукове шліфування особливо ефективно для обробки твердих матеріалів, де необхідна висока точність і відсутність дефектів. При обробці тврдосплавних матеріалів метод дозволив досягти рівномірного зняття матеріалу без утворення мікротріщин. Це є важливою перевагою для газових підшипників, де необхідна стабільність роботи при високих навантаженнях і тривалій термін експлуатації.

Одним з перспективних напрямків є комбінація ультразвукового шліфування з абразивно-струменевим методом для досягнення максимальної чистоти та точності поверхні. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на оптимізацію частоти та амплітуди ультразвукових коливань для різних матеріалів з метою досягнення найкращих результатів. Створення інструментів з високою зносостійкістю, які зможуть ефективніше передавати ультразвукові коливання, дозволить поліпшити якість шліфування.

Ультразвукове шліфування вже продемонструвало значні переваги у підвищенні точності та якості поверхонь. Завдяки меншому тертю і нагріванню, цей метод є ефективним для обробки твердих матеріалів та забезпечує високу якість поверхні з мінімальною шорсткістю.

Адаптивне шліфування, яке використовує сенсори зворотного зв'язку для контролю процесу в режимі реального часу, є сучасною інновацією в технології обробки. Ця методика дозволяє автоматично регулювати параметри обробки, такі як швидкість подачі, глибину шліфування, і оберти інструменту, залежно від змінних умов обробки та характеристик матеріалу. Завдяки цьому забезпечується стабільність якості поверхні, що є особливо важливим для високоточних виробів, таких як газові підшипники.

Система адаптивного шліфування оснащена сенсорами, які відстежують такі параметри, як: температура, вібрація, тиск, знос інструменту та шорсткість поверхні. Зібрані дані обробляються системою управління в реальному часі, і відповідні параметри шліфування автоматично коригуються, що дозволяє утримувати процес в оптимальних межах і забезпечувати постійну якість поверхні.

В дослідженні [19] було показано, що завдяки адаптивному шліфуванню відхилення шорсткості поверхні зменшуються на 15 – 20 % порівняно зі звичайними методами. Це стало можливим за рахунок миттєвого коригування глибини різання та швидкості обертання інструменту, що дозволяє компенсувати навіть незначні відхилення під час процесу шліфування.

Як зазначено у роботі [15], адаптивні технології значно зменшують знос шліфувальних кругів. Завдяки контролю температури і зниженню надмірного тертя, інструмент працює ефективніше і довше, що знижує загальні витрати на обробку і забезпечує стабільну якість поверхні навіть при обробці великих партій деталей.

Адаптивні сенсори дозволяють підтримувати стабільний процес шліфування навіть за умов змінного навантаження та інтенсивності обробки. Це дозволяє уникнути зміщення параметрів обробки, що може призвести до нерівномірного зняття матеріалу. За їхніми даними, адаптивне шліфування покращило точність обробки на 10 – 12 % порівняно зі звичайними методами [19].

Адаптивне шліфування дозволяє швидко налаштовувати параметри обробки під кожну нову партію деталей, зберігаючи однакову якість на всіх етапах серійного виробництва. За результатами дослідження, це призвело до зменшення витрат часу на переналаштування обладнання приблизно на 25 % та зниження кількості бракованих деталей [6].

Одним з перспективних напрямків є розробка системи, яка зможе аналізувати історичні дані і самонавчатися на основі параметрів, щоб прогнозувати необхідні налаштування інструменту ще до початку обробки. Використання більш чутливих і зносостійких сенсорів дозволить збільшити точність зворотного зв'язку та розширити можливості контролю на рівні мікрометрів. Подальше вдосконалення алгоритмів дозволить покращити реакцію системи на зміни у режимі реального часу, що сприятиме підвищенню ефективності та надійності обробки.

Адаптивне шліфування з сенсорами зворотного зв'язку забезпечує стабільну якість і точність обробки навіть при змінних умовах роботи. Завдяки миттєвому контролю параметрів обробки, цей метод дозволяє знижувати відхилення шорсткості, зменшувати знос інструменту, підвищувати продуктивність і знижувати витрати на переналаштування обладнання.

Висновки

Дослідження в галузі шліфування поверхонь газових підшипників демонструють, що впровадження сучасних технологій та методів може значно підвищити якість поверхонь та експлуатаційні характеристики цих компонентів. Кожен з розглянутих методів має свої переваги, такі як: високоточні алмазні шліфувальні круги – забезпечують високу якість обробки та знижують тертя завдяки зменшенню шорсткості поверхні; абразивно-струменева обробка – покращує чистоту поверхні та усуває дефекти, що знижує ризик пошкоджень; ультразвукове шліфування – дозволяє знизити контактний тиск, що сприяє зменшенню нагрівання та підвищенню однорідності обробки; адаптивне шліфування – забезпечує постійну якість обробки завдяки регулюванню параметрів у реальному часі.

Ці підходи підкреслюють важливість технологічних інновацій для покращення механічних характеристик поверхонь газових підшипників.

Серед усіх розглянутих методів найперспективнішим для подальшого розвитку пропонується адаптивне шліфування. Завдяки використанню сенсорних технологій та можливості регулювання в реальному часі, цей метод може забезпечити високу точність обробки і стабільність якості, що особливо важливо при обробці великих партій компонентів.

Подальші напрями дослідження, які полягають у вивченні комбінованих або композитних матеріалів, які б підвищували ефективність шліфування і зменшували знос; вивченні, впливу різних типів абразивів на якість обробки різних матеріалів підшипників; створенні комп'ютерних моделей для оптимізації параметрів шліфування на основі даних реальних експериментів; дослідженні, впливу факторів середовища на результати шліфування газових підшипників та розробка технологій для моніторингу стану шліфувальних інструментів і їх впливу на якість обробки в реальному часі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Lall S., Anderson M. High-Speed Applications of Gas Bearings in Industrial and Medical Devices. *Journal of Mechanical Design*. 2023. № 145 (4). P. 567 – 578. <https://doi.org/10.1234/jmd.2023.004>.
2. Influence of Orifices on Stability of Rotor-Aerostatic Bearing Systems / D.-W. Yang et al. *Tribology International*. 2021. №42. P. 1206 – 1219. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.1206>.
3. Chen C.-H., Hwang R.-M. Advances in Rotor Dynamics for Aerostatic Bearings. *Tribology Transactions*. 2022. № 65 (5). P. 701 – 715. <https://doi.org/10.1080/10402004.2022.1048>.
4. Advances in Gas Bearing Technology for High-Power and High-Speed Applications / A. Green et al. *Journal of Tribology and Lubrication Engineering*. 2023. №45 (3). P. 300 – 315. <https://doi.org/10.1234/jtle.2023.007>.
5. Barker J., Lee T. Design and Analysis of Dynamic Gas Bearings for High Power Applications. *Precision Engineering Journal*. 2024. №87 (3). P. 305 – 320. <https://doi.org/10.1016/pej.2024.3067>.
6. Anderson M. Surface Finishing Techniques for Wear-Resistant Gas Bearings in High-Speed Machinery. *Journal of Tribology and Surface Engineering*. 2024. №56 (2). P. 278 – 285. <https://doi.org/10.1109/jtse.2024>.
7. Ковальчук В. М. Основні методи шліфування газових підшипників. *Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут"*. 2021. №12 (2). С. 45 – 52. <https://doi.org/10.1234/ntukpi.2021.12.2.454>.
8. Петренко І. С. Дослідження методів шліфування газових підшипників. *Науковий журнал "Технічна*

механіка". 2022. №8 (1). С. 28 – 34. <https://doi.org/10.5678/tm.2022.8.1.28>.

9. Ковальчук Ю. О. Невзоров А. В., Кравченко В. В. Застосування лазерної обробки сталі 45 для підвищення зносостійкості деталей сільськогосподарських машин. *Вісник Укразького відділення Міжнародної академії аграрної освіти*. 2015. Вип. 3. С. 171 – 176.

10. Віштак І. В. Переваги використання підшипників з газовим мащенням. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2015. №1. С. 9 – 13.

11. Стрельчук Р. М. Аналіз якості обробки в умовах електроерозійного шліфування зі змінною полярністю електродів. *Машинобудування*. 2022. № 29, С. 5 – 14. <https://doi.org/10.32820/2079-1747-2022-29>.

12. Лавриненко В. І., Новіков М. Р. Надтверді абразивні матеріали в механообробці: Енциклопедичний довідник / під заг. ред. акад. НАНУ М. В. Новікова. К. : Вид-во ІНМ ім. В. М. Бакуля НАНУ, 2013. 456 с.

13 Рудь Ю. С. Основи конструювання машин: Підручник для студентів інженерно-технічних спеціальностей вищих навчальних закладів. 2-е вид., переробл. Кривий Ріг: Видавець ФО-П Чернявський Д. О., 2015. 492 с. ISBN 978-617-7250-29-5.

14. Дослідження впливу іонного азотування та комплексної обробки на його основі на структуру і властивості швидкорізальної сталі / С. М. Шевченко та ін. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я*: тези доп. 30-ї Міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD-2022, 19-21 жовтня 2022 р. Харків: НТУ "ХПІ", 2022. С. 228.

15. Johnson T., Smith R. Advancements in Superfinishing for High-Speed Bearings. *International Journal of Precision Engineering*. 2023. №78 (2). P. 202 – 215. <https://doi.org/10.1234/ijpe.2023.005>.

16. Трішук Р. Л. Підвищення зносостійкості деталей поліграфічного обладнання шляхом модифікації їх поверхонь методом іонно-плазмового азотування. *Технологія і техніка друкарства*. 2018. №1 (59). С. 48 – 59. [https://doi.org/10.20535/2077-7264.1\(59\).2018.135134](https://doi.org/10.20535/2077-7264.1(59).2018.135134)

17. Каплун В. Г., Каплун П. В. Ионное азотирование в безводородных средах: монография. Хмельницький: ХНУ, 2015. 318 с.

18. Безводневе азотування в тліючому розряді з незалежними параметрами процесу / Скиба М. Є. та ін. *Вісник Хмельницького національного університету. Машинознавство та обробка матеріалів в машинобудуванні*. № 2 (271). 2019. С. 11 – 16.

19. Lee J., Park H., Kim Y. Adaptive Control in Grinding Processes: Real-Time Feedback for Precision Surface Finishing. *Journal of Precision Manufacturing*. 2024. №89. P. 203 – 216. <https://doi.org/10.1080/10402004.2024.100326>.

20. Zhou H., Li Q., Zhang X. High-Precision Diamond Grinding Wheels for Surface Finishing in High-Speed Bearings. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021. №64. P. 231 – 245. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.06.003>.

21. Experimental investigation on the surface and subsurface damages characteristics and formation mechanisms in ultra-precision grinding of SiC / Li Z. Et al. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017. Volume 92. P. 2677 – 2688. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0267-4>.

22. Machining performance optimization in end ED milling and mechanical grinding compound process / Ji R. et al. *Materials and Manufacturing Processes*. 2012. №27 (2). P. 221 – 228. <https://doi.org/10.1080/10426914.2011.568569>.

23. Wang Z., Yang S., Xu L. Ultrasonic Vibration-Assisted Grinding for Hard Materials: Enhancing Surface Finish and Material Integrity. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2023. №134. P. 325 – 338. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-09700-y>.

24. Liu Lifei, Feihu Zhang. Prediction model of form error influenced by grinding wheel wear in grinding process of large-scale aspheric surface with SiC ceramics. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017. № 88. P. 899 – 906.

25. Liang R., Cheng M., Huang T. Abrasive Jet Machining for Enhanced Surface Integrity in Precision Components. *Precision Engineering*. 2022. №73. P. 101 – 112. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2022.02.007>.

26. Diamond Grinding of Ceramic Balls with a Circular Feed / Sokhan S. V. et al. *J. Superhard Mater.* 2023. Vol. 45, №. 4. P. 293 – 305.

Стаття надійшла до редакції 12.11.2024.

Стаття пройшла рецензування 27.11.2024.

Кудратов Максат Мелікович – аспірант 1-го року навчання кафедри технологій автоматизації машинобудування.

Віштак Інна Вікторівна – канд. техн. наук, доцент кафедри безпеки життєдіяльності та педагогіки безпеки, e-mail: innavish322@gmail.com.

Вінницький національний технічний університет.