

І. В. Віштак¹
М. М. Кудратов¹

АНАЛІЗ СПОСОБІВ ЗМІЦНЕННЯ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ДЕТАЛЕЙ ГАЗОВИХ ПІДШИПНИКІВ

¹Вінницький національний технічний університет

Метою роботи є аналіз способів зміцнення поверхневого шару деталей газових підшипників стосовно їхнього впливу на довговічність.

У дослідженні застосовано комплексну методологію, що передбачає використання загальнонаукових методів аналізу та синтезу, порівняльного аналізу, а також методу структурування. Визначено основні характеристики кожного способу, зокрема вплив на мікротвердість, зносостійкість, стійкість до високотемпературних навантажень та формування оптимальної мікроструктури поверхневого шару. Подальше структурування матеріалів дозволило виявити взаємозв'язок між технологічними особливостями зміцнювальних способів та їхньою ефективністю в умовах високошвидкісної й високотемпературної роботи газових підшипників. Аналіз наукових публікацій показав, що комбіноване застосування способів зміцнення дозволяє суттєво покращити експлуатаційні характеристики підшипників, зменшуючи тертя та збільшуючи ресурс роботи.

Практичне значення аналізу способів зміцнення поверхневих шарів газових підшипників має важливе значення, оскільки довговічність та експлуатаційна надійність підшипників безпосередньо впливають на ефективність роботи високошвидкісного роторного обладнання, авіаційних та енергетичних систем. Враховуючи те, що газові підшипники функціонують в складних умовах (високі температури, значні механічні навантаження, інтенсивний знос), вибір оптимального способу зміцнення є критично важливим для забезпечення їхньої тривалої та безперебійної роботи.

Ключові слова: газовий підшипник, поверхневий шар, зміцнення, довговічність, надійність, експлуатаційні характеристики.

Вступ

Газові підшипники широко використовуються в прецизійних системах та швидкообертючих шпинделях завдяки їхнім низьким втратам на тертя та високій точності позиціонування. Проте, за таких умов як: висока частота обертання, недостатня чистота газу, що подається, підвищена температура поверхонь обертання, матеріал підшипника тощо, робочі поверхні підшипників можуть піддаватися газовій ерозії та корозії, що негативно впливає на їхні експлуатаційні характеристики. Дослідження [1] показали, що одним з підходів до вирішення цієї проблеми є правильний підбір матеріалів та застосування відповідних способів зміцнення поверхонь валу, зокрема канавок, що блокують зношування та адгезійне зношування поверхонь пар тертя.

Надійність є одним з основних показників якості машини, оскільки вона визначає її експлуатаційні характеристики, зокрема зносостійкість, стійкість до втомного руйнування, міцність посадок та спряжень, а також корозійну стійкість. Оцінювання якості поверхневого шару включає аналіз мікротвердості поверхні, шороховатості (Ra , Rz тощо), глибини зміцненого шару, структуру та фазовий склад матеріалу в поверхневому шарі, залишкові напруження, стан оксидної плівки, коефіцієнт тертя тощо.

Зміцнення поверхневих шарів газових підшипників може здійснюватися за допомогою різних способів. Фрикційне зміцнення дозволяє зміцнювати поверхні з різною геометрією.

Підвищення довговічності та працездатності деталей машин досягається шляхом вдосконалення технологій відновлення та зміцнення поверхонь тертя. Вибір конкретного способу залежить від умов експлуатації, геометричних параметрів деталі та економічної доцільності його застосування.

Метою роботи є аналіз способів зміцнення поверхневих шарів газових підшипників та їхнього впливу на довговічність та надійність під час експлуатації.

Результати дослідження

Експлуатаційні характеристики робочих поверхонь газових підшипників є критичними для забезпечення надійності та довговічності високошвидкісного обладнання. Газові підшипники, завдяки наявності газового прошарку між валом і підшипником, запобігають безпосередньому контакту поверхонь, що зменшує тертя та знос робочих поверхонь.

Вимоги, що висуваються до газових підшипників, такі: мінімальне тертя у зоні контакту, висока точність обробки поверхонь, стійкість за високих частот обертання, низький рівень вібрацій, стійкість до агресивного середовища. Проте навіть за таких умов, поверхні підшипників можуть піддаватися газовій ерозії та корозії, що негативно впливає на їхні експлуатаційні характеристики. Дослідження в роботах [1]—[3] показали, що одним з підходів до вирішення цієї проблеми є правильний підбір як матеріалів з достатньою стійкістю, так і застосування різних способів зміцнення поверхонь вала, зокрема канавок на валу підшипника, які зменшують зношування та адгезійне схоплювання поверхонь пар тертя.

Таким чином, для підвищення експлуатаційних характеристик поверхонь газових підшипників необхідно враховувати як матеріальні, так і конструктивні аспекти, а також умови експлуатації та можливі способи зміцнення поверхонь.

Будь-які пошкодження або руйнування деталей машин розпочинаються з поверхневого шару, тому важливе значення має стан цього шару деталей, що контактують. До основних характеристик, які визначають експлуатаційні властивості деталей, належать:

- якість поверхні деталей, зокрема шорсткість, хвилястість, відхилення форми та субмікрошорсткість, які суттєво впливають на зносостійкість, втомну міцність, корозійну стійкість, міцність з'єднань та інші експлуатаційні показники. Менша шорсткість поверхні зменшує зношування, підвищує межу втомної міцності та підвищує антикорозійну стійкість;

- матеріальні властивості деталей, такі як фізичні, механічні, електрофізичні, електрохімічні характеристики, що визначають поведінку матеріалу під навантаженнями, температурою та агресивним середовищем;

- зносостійкість — здатність матеріалу протистояти поверхневому руйнуванню під дією тертя, що залежить від якості поверхні та властивостей матеріалу;

- корозійна стійкість — здатність протистояти руйнівній дії кислотних, лужних та інших агресивних середовищ;

- втомна міцність — здатність матеріалу витримувати циклічні навантаження без руйнування, що також залежить від якості поверхні та матеріалу;

- міцність з'єднань — залежить від якості поверхні та точності обробки, що забезпечує герметичність, щільність і надійність з'єднань;

- технологічні властивості матеріалу, такі як деформівність, ковкість, зварність, здатність до паяння, які впливають на можливість виготовлення та подальшої обробки деталей, що також позначається на їхніх експлуатаційних властивостях.

Отже, експлуатаційні властивості деталей визначаються комплексом характеристик якості поверхні (шорсткість, хвилястість, форма), матеріальними властивостями (міцність, корозійна стійкість, зносостійкість), а також технологічними параметрами матеріалу і способами обробки, що забезпечують довговічність і надійність роботи деталей у заданих умовах експлуатації.

Оцінювання якості поверхневого шару включає комплексний аналіз таких параметрів:

- геометричні параметри — визначаються формою поверхні, її мікрорельєфом (шорсткість, субшорсткість, хвилястість) та точністю виготовлення;

- фізико-хімічні характеристики — включають хімічний склад, фазовий стан, мікротвердість, рівень залишкових напружень та екзоелектронну емісію, що можуть впливати на корозійну стійкість та довговічність деталей;

- механічні властивості — границя міцності, границя текучості, втомна міцність, тріщиностійкість, зносостійкість та контактна жорсткість визначають здатність деталі витримувати навантаження без руйнування.

Отже, якісний аналіз поверхневого шару дозволяє прогнозувати експлуатаційні характеристики деталей, запобігати їхньому передчасному зношуванню та руйнуванню, що безпосередньо впливає на довговічність і надійність всієї конструкції [1]—[3].

Реальні поверхні деталей машин відрізняються від ідеальних через наявність макро- та мікронерівностей, що значно впливають на їхні експлуатаційні властивості. Ці нерівності можуть спричиня-

ти підвищене зношування деталей через механічне зчеплення, сколювання та зріз нерівностей.

Стан поверхневого шару деталей, сформований під час технологічної обробки, а також особливості контактної взаємодії та умов навантаження, суттєво впливають на робочі характеристики деталей. Відхилення форми та хвилястість поверхні можуть призводити до нерівномірного зношування на окремих ділянках поверхні, що негативно позначається на експлуатаційних властивостях деталей.

Взаємодія зазначених факторів утворює складну динамічну систему, в якій під час експлуатації зміна стану поверхневого шару супроводжується зміною умов навантаження та характеристик контактної взаємодії. Процес припрацювання робочих поверхонь супроводжується формуванням на поверхні вторинних структур, що призводить до зменшення коефіцієнта тертя у спряженнях, а отже, до зниження наявних навантажень та зміни їхнього характеру.

Характер і величина навантажень залежать від конструкції вузлів та умов їхньої експлуатації. Якщо зменшення цих навантажень неможливе або нерациональне через конструктивні обмеження, доцільно застосовувати способи поверхневого зміцнення, сприяючи досягненню рівноваги в системі «поверхневий шар — умови навантаження». Зокрема, електроімпульсне вигладжування з модифікуванням та алюотермія показали ефективність у підвищенні зносостійкості деталей машин. Дослідження показали, що після електроімпульсного вигладжування зносостійкість збільшується в 1,8 рази [4].

У деяких випадках досягнення рівноваги в динамічній системі неможливе під час експлуатації спряжень в умовах динамічного навантаження. Тому для підвищення ресурсу роботи виробів та зниження швидкості їхнього зношування доцільно використовувати технології поверхневого зміцнення. Завдання встановлення прямого зв'язку між експлуатаційними властивостями сформованого поверхневого шару та його параметрами є складним. Це зумовлено процесами, що відбуваються в поверхневому шарі під час експлуатації, а також різними умовами навантаження [5].

Хімічний склад, мікрогеометрія та структурно-фазовий стан поверхневого шару деталей суттєво впливають на їхню довговічність та працездатність. Під час експлуатації саме поверхневий шар матеріалу зазнає найбільших навантажень, контактуючи з іншими деталями та взаємодіючи із зовнішнім середовищем. Різні технологічні способи обробки дозволяють модифікувати поверхневий шар відповідно до заданих умов експлуатації, керуючи його структурою, фазовим складом, рівнем залишкових напружень, твердістю та мікрогеометрією. Ці способи також сприяють усуненню дефектів, таких як пори та мікротріщини, забезпечуючи зміцнення поверхні [6].

Електроіскрове легування є одним із ефективних способів зміни хімічного складу та властивостей поверхневих шарів, що базується на використанні концентрованих електричних розрядів для перенесення матеріалу електрода на поверхню деталі. Цей спосіб дозволяє формувати поверхневий шар з високими експлуатаційними характеристиками, зокрема підвищеною твердістю та зносостійкістю [7]—[11].

Загалом, підвищення довговічності та працездатності деталей машин досягається шляхом вдосконалення технологій відновлення та зміцнення поверхонь тертя, що дозволяє зменшити швидкість зношування та збільшити ресурс роботи виробів [12]—[21].

Сучасне машинобудування активно впроваджує технології зміцнення поверхневих шарів металів, що дає змогу забезпечувати їхню мікротвердість, відхилення геометрії та рівень залишкових напружень. Способи поверхневого зміцнення відрізняються фізико-хімічними процесами, технічними характеристиками та ефективністю. Покращення експлуатаційних властивостей деталей досягається шляхом нанесення покриттів або модифікації поверхневого шару. У першому випадку між покриттям і основним матеріалом утворюється зона розмежування, тоді як модифікація змінює фазовий і напружений стан без порушення кристалічної структури металу. Поверхнєве зміцнення є економічнішим і менш трудомістким порівняно з об'ємним.

Технологічні способи зміцнення металів поділяють на шість основних класів, кожен з яких охоплює різні процеси залежно від умов їхнього виконання, таких як середовище (газове, рідинне, електропровідне або діелектричне), тиск і температура.

Один з найперспективніших підходів до підвищення міцності деталей полягає у зміні структури поверхневого шару. До цієї категорії належать такі способи, як фізико-термічна обробка, наплавлення легованим металом, електрофізична та механічна обробка [22]—[24].

Фізико-термічні способи включають лазерне та плазмове зміцнення [25]—[27]. Використання лазерного променя для зміцнення поверхонь є актуальним у машинобудуванні, особливо коли

необхідно зміцнити лише певні ділянки деталі або складні за формою поверхні. Процес реалізується за допомогою оптичного квантового генератора (лазера) і має низку переваг, зокрема:

- можливість локального зміцнення у зонах з інтенсивним зношуванням;
- обробка важкодоступних поверхонь;
- точкове зміцнення великих площ;
- регулювання мікрошорсткості зміцнених поверхонь;
- відсутність деформації деталей завдяки локальному термічному впливу;
- простота автоматизації процесу обробки складних контурів [28], [29].

Вибираючи спосіб зміцнення поверхонь газових підшипників, потрібно враховувати не лише переваги, а й обмеження конкретних технологій. Газові підшипники працюють у високоточних умовах, де важливі параметри: низька шорсткість, точність геометрії, термостійкість, стабільність шару за високої швидкості газового потоку тощо [30]—[47].

Основні недоліки фізико-термічних способів зміцнення (лазерного та плазмового), які обмежують їхнє застосування саме для поверхонь газових підшипників подано в таблиці.

Недоліки лазерного та плазмового зміцнення для газових підшипників

Недолік	Пояснення
1. Підвищення шорсткості	Після лазерної чи плазмової дії може збільшуватись шорсткість поверхні, що є критичним для газових підшипників, які вимагають ультрагладкої поверхні ($Ra \leq 0,05$ мкм)
2. Можливість викривлення або мікродеформацій	Навіть мінімальний термічний вплив на мікрорівні здатен порушити геометрію або співвісність, що знижує точність підшипника.
3. Утворення мікротріщин	Через високий температурний градієнт можливе утворення мікротріщин у зміцненому шарі, що знижує довговічність і зносостійкість
4. Нерівномірність структури шару	Під час обробки складних за формою або малих деталей важко гарантувати однорідність зміцненого шару. Це негативно впливає на рівномірність газового зазору
5. Висока енерговитратність	Порівняно з іншими способами (наприклад, CVD, PVD, іонна імплантація) лазерне/плазмове зміцнення є енергоємнішим
6. Потреба в подальшій обробці	У більшості випадків після термообробки потрібно доводити поверхню (шліфування, полірування), що ускладнює процес
7. Обмеження щодо матеріалів	Не всі матеріали, що застосовуються для газових підшипників (наприклад, кераміка, композити), можуть бути ефективно зміцнені фізико-термічними способами без пошкодження

Електрофізичні способи зміцнення належать до технологічних процесів обробки поверхні деталей машин із застосуванням висококонцентрованих джерел енергії. У цих способах зміцнення поверхневих шарів енергія фокусується на невеликій ділянці поверхні, де потужність може досягати $10^3 \dots 10^8$ Вт/см². Перетворення енергії електромагнітного поля або електричного струму в теплову в зоні впливу забезпечує можливість не лише плавлення, а й випаровування металу. Висока концентрація енергії досягається завдяки її локалізації в просторі та часі через спрямовану подачу у вигляді розрядного каналу, плазмового потоку, лазерного променя або електричного заряду [48].

Електроконтактні способи базуються на використанні тепла, що виникає під час проходження електричного струму через ділянки з підвищеним опором, зокрема через контакти. Завдяки простоті та економічності цей спосіб поверхневого зміцнення широко застосовується [48]. Його суть полягає у виділенні тепла під час проходження струму певної густини через замкнутий електричний ланцюг. Інтенсивність нагріву залежить від опору провідника, і температура в зонах з підвищеним опором може сягати $3 \dots 5 \times 10^3$ К/с [48]. Підвищення температури в електроконтактних способах можуть бути несумісними з вимогами газових підшипників, які вимагають надточності та низької температури тертя. Невідповідність вимогам щодо пошкоджень поверхні (мікротріщини, деформація) може знижувати ефективність газового зазору, що є критично важливим для правильної роботи газових підшипників.

Електроерозійні способи зміцнення базуються на принципі електричної ерозії, що спричиняє контрольоване локальне руйнування електропровідного матеріалу під дією імпульсних електричних розрядів між електродом-інструментом і заготовкою. Електроерозійне зміцнення та нанесення покриттів є окремим видом цього процесу, що здійснюється за допомогою вібруючого електрода-зміцнювача в повітряному середовищі. У результаті короткотривалого впливу високої температури відбувається термічна обробка, дифузія та перенесення легувальних елементів з електрода-зміцнювача на оброблювану поверхню. Цей спосіб застосовується для поліпшення фізико-

механічних характеристик металів, зокрема підвищення їхньої жаростійкості, корозійної та зносостійкості.

Головною перевагою електроерозійного зміцнення є можливість регулювання експлуатаційних властивостей покриттів, а також модифікація фізико-хімічних та структурних параметрів матеріалу електрода. Проте основним недоліком цього способу є його низька продуктивність, що обмежує його використання переважно для локального нанесення покриттів на невеликі ділянки поверхні [48].

До недоліків цього способу можна віднести утворення мікротріщин на поверхні підшипника, що знижує його механічну міцність і може викликати пошкодження газового шару, особливо в умовах високих навантажень та швидкостей. Хоча електроерозійне зміцнення може підвищувати зносостійкість, в газових підшипниках, де критична роль відводиться точності і чистоті поверхні, такий спосіб може призвести до зниження зносостійкості через формування шорстких або нерівномірних покриттів.

Операція ультразвукового зміцнення поверхонь передбачає пластичне деформування приповерхневих і поверхневих шарів деталей машин за рахунок комбінованої дії статичної та динамічної сил, що виникають у коливній системі, яка складається з магнітострикційного перетворювача, концентратора та ультразвукового генератора. В процесі оброблення відбувається як згладжування нерівностей, що залишилися після механічної обробки, так і зміцнення матеріалу.

Основними перевагами цього способу є його висока ефективність і продуктивність, а також можливість оброблення деталей зі складною геометрією, для яких застосування інших способів зміцнення є ускладненим. До того ж, ультразвукове зміцнення може поєднуватися з іншими способами для підвищення загальної ефективності процесу. Важливою особливістю є можливість отримання як поверхневого, так і об'ємного зміцнення або їхньої комбінації, що розширює сферу застосування цієї технології.

Завдяки такому обробленню формується сприятливий розподіл залишкових напружень і оптимізується структурний стан металу, що дозволяє збільшити запас міцності деталей, які працюють у змінних навантаженнях, у 2—3 рази та значно продовжити їхній експлуатаційний ресурс. Ультразвукове зміцнення підвищує мікротвердість до 180 %, а зносостійкість деталей — у 1,5...1,8 рази, при цьому глибина зміцненого шару сягає 1,5 мм [49].

Ультразвукове зміцнення має деякі обмеження у разі застосування для газових підшипників, зокрема через недостатню глибину зміцнення, можливі деформації поверхні, нерівномірний розподіл залишкових напружень і складність у застосуванні при високих швидкостях обертання. Такі фактори можуть обмежувати його ефективність для цього типу підшипників.

Фрикційне зміцнення та поверхневе пластичне деформування (зокрема, дробоструменеве зміцнення, карбування, вибухове, вібраційне та вібраційно-відцентрове зміцнення) належать до механічних способів підвищення міцності поверхні деталей машин [50]. Поверхневе пластичне деформування застосовується для збільшення твердості поверхневого шару металу, підвищення стійкості до втомного руйнування, а також створення залишкових стискальних напружень і формування мікрорельєфу відповідно до технічних вимог [50].

До механічних способів також відноситься обробка деталей у процесі виготовлення, яка дозволяє контролювати якість поверхневих шарів і забезпечувати необхідні розміри та форму виробу [51]. Фрикційне зміцнення є одним із способів підвищення твердості поверхні деталей машин з використанням висококонцентрованих джерел енергії. Дослідження температурних і силових параметрів цього процесу показали, що для утворення зміцнених (білих) шарів необхідно досягти певних значень тиску та температури, що стає можливим завдяки підвищенню тертя між інструментом і деталлю.

Спосіб фрикційного зміцнення має технологічну схожість зі шліфуванням, оскільки передбачає встановлення на шпиндель шліфувального верстата металевого диска, а сам процес обробки відбувається аналогічно шліфуванню. Важливою умовою є подача технологічного середовища (наприклад, мінеральної оливи) у зону контакту деталь-інструмент. Це забезпечує насичення поверхневого шару вуглецем і покращує мікрогеометрію оброблюваної поверхні.

Застосування металевго інструмента дозволяє значно підвищити швидкість оброблення (до 40...70 м/с і більше), що сприяє створенню високих температур і тисків у зоні контакту. У результаті шорсткість обробленої поверхні може становити $Ra = 1,0...0,16$ мкм. Для виготовлення інструментів використовують вуглецеві сталі у вихідному стані. Вибір матеріалу інструмента здійснюється з урахуванням необхідності створення максимальної відмінності у фізико-механічних властивостях між оброблюваною деталлю та інструментом, що дозволяє запобігти налипанню

металу і формуванню наростів. До прикладу, для зміцнення загартованих деталей рекомендується застосовувати інструмент зі сталі іншої марки в незагартованому стані.

Цей технологічний спосіб дозволяє зміцнювати не лише плоскі та циліндричні поверхні деталей машин, а й поверхні зі складною геометрією, зокрема профіль різьби. Таким чином, фрикційне зміцнення можна застосовувати для всіх видів сталі, які піддаються гартуванню, а також для високоміцних і сірих чавунів, забезпечуючи підвищення міцності їхнього поверхневого шару.

Висновки

Фрикційне зміцнення є ефективним способом підвищення експлуатаційних характеристик деталей машин, особливо тих, що мають циліндричні поверхні. Його використання для зміцнення циліндричних поверхонь має низку суттєвих переваг, таких як:

- рівномірність — розподіл тепла та навантаження по всій поверхні, що сприяє отриманню однорідної структури зміцненого шару, що важливо для запобігання локальних напружень і дефектів;
- підвищення міцності та зносостійкості. Внаслідок інтенсивного тертя між інструментом і деталлю у зоні контакту досягається локальний нагрів, що спричиняє термічну обробку поверхневого шару. Після швидкого охолодження формується тонкодисперсна структура, що значно покращує твердість, зносостійкість та втомну міцність циліндричних деталей;
- можливість обробки різних матеріалів. Спосіб ефективний для зміцнення конструкційних, інструментальних та високоміцних сталей, а також сірих і високоміцних чавунів. Він дозволяє покращити механічні властивості без застосування дорогих легованих матеріалів або складних технологічних процесів;
- поліпшення мікрогеометрії поверхні. В результаті обробки відбувається згладжування мікронерівностей, що знижує коефіцієнт тертя і підвищує зносостійкість деталей. Це особливо важливо для циліндричних деталей, які працюють у вузлах тертя або піддаються великим контактним навантаженням;
- економічність процесу. Фрикційне зміцнення можна здійснювати на стандартних токарно-гвинторізних верстатах без необхідності залучення складного додаткового обладнання. Це дозволяє значно знизити виробничі витрати та забезпечує високу продуктивність процесу;
- збільшення довговічності деталей. Зміцнення циліндричних поверхонь сприяє підвищенню ресурсу експлуатації деталей за рахунок створення шару з високою твердістю, зменшення ризику виникнення мікротріщин та підвищення втомної міцності. Це особливо актуально для валів, осей, підшипників, гільз циліндрів та інших деталей, що працюють у динамічних навантаженнях.

Отже, фрикційне зміцнення є ефективним, технологічним та економічно доцільним способом поліпшення характеристик циліндричних поверхонь, що забезпечує їхню високу якість, надійність і довговічність. В подальших дослідженнях планується встановлення залежності впливу рівня зміцнення поверхневого шару на експлуатаційні характеристики газових підшипників під час їхньої роботи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] К. А. Ющенко, Ю. С. Борисов, В. Д. Кузнецов, і В. М. Корж, *Інженерія поверхні*, Київ: Наукова думка, 2007, 558 с.
- [2] В. М. Голубець, *Технологічні методи поверхневого зміцнення металічних конструкційних матеріалів*, Львів: ВТФ Друкарство, 2000, 178 с.
- [3] P. A. Dearnley, *Introduction to Surface Engineering*, Cambridge University Press, 2017, 325 p.
- [4] В. Тулупов, і С. Онищук, «Дослідження технологій поверхневого зміцнення деталей машин», *Технічні науки та технології*, № 3 (25), с. 55-60, 2021. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2021-3\(25\)-55-60](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2021-3(25)-55-60).
- [5] С. В. Ковалевський та ін., *Нові комбіновані методи оброблення робочих поверхонь деталей машинобудування (із застосуванням нейросітьового аналізу)*, Краматорськ: ДДМА, 2013, 196 с. ISBN 978-966-379-665-9.
- [6] Л. М. Сусліков, і І. П. Студеняк, *Неруйнівні методи контролю*, навч. посіб. Ужгород, Україна: вид-во УжНУ, 2016, 192 с.
- [7] M. Zhang, Z. Jiang, M. Niu, Y. Sun, and X. Zhang, "Tribological behavior of CoCrFeNiMn high-entropy alloy against 304, Al₂O₃ and Si₃N₄ counterparts," *Wear*, vol. 508, p. 204471, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2022.204471>.
- [8] C. Y. Hsu, T. S. Sheu, J. W. Yeh, and S. K. Chen, "Effect of iron content on wear behavior of AlCoCrFexMo0.5Ni high-entropy alloys," *Wear*, vol. 268, no. 5, pp. 653-659, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2009.10.013>.
- [9] S. Yang, S. Gao, W. Xue, B. Wu, H. Cheng, and D. Duan, "Epitaxial growth and oxidation behavior of the NiCoCrAlYTa/Y₂O₃ coating on a nickel-based single-crystal superalloy blade tips, produced by electro spark deposition," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 931, pp. 167600, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.167600>.
- [10] С. В. Іващенко, Г. Г. Лобачова, Н. А. Шаповалова, і К. С. Ігнасюк, «Створення функціональних покриттів на поверхні маловуглецевої сталі багатостадійним електроіскровим легуванням хромом та графітом у насичувальних середовищах», *Проблеми тертя та зношування*, № 2 (71), с. 62-66, 2016.
- [11] О. П. Гапонова, «Аналіз якості комплексних сульфоцементованих покриттів, отриманих методом електроіскрового легування», *Наукові нотатки*, т. 67, с. 24-28, 2019. <https://doi.org/10.36910/6775.24153966.2019.67.4>.

- [12] M. F. Grosso, G. Bozzolo, and H. O. Mosca, "Modeling of high entropy alloys of refractory elements," *Physica B Condensed Matter*, vol. 407, no. 16, pp. 3285-3287, 2012. [Electronic resource]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.physb.2011.12.088>.
- [13] С. В. Івашченко, Г. Г. Лобачова, Л. Ф. Яценко, і В. Ф. Мазанко, «Вплив хромового аноду на формування поверхневих шарів сплавів Fe-Cr при електроіскровому легуванні,» *Вісник українського матеріалознавчого товариства*, № 3, с. 16-22, 2010.
- [14] В. В. Аулін, «Трибофізичні основи підвищення зносостійкості деталей та робочих органів сільськогосподарської техніки.» автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.02.04., Хмельницький національний університет, Хмельницький, 2015.
- [15] М. І. Денисенко, О. В. Зазимко, і В. Ф. Лабунець, «Дослідження поверхонь тертя робочих органів ґрунтообробних сільськогосподарських машин,» *Проблеми тертя та зношування*, № 1 (70), с. 150-153, 2016.
- [16] М. І. Денисенко, і В. І. Рубльов, «Підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин з використанням точкового зміцнення,» *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*, зб. наук. праць КНТУ, т. 24, № 2, с. 28-35, 2011.
- [17] М. І. Денисенко, і А. С. Опальчук, «Зношування та підвищення довговічності робочих органів сільськогосподарських машин,» *Вісник ТНТУ*, № 2, с. 201-210, 2011.
- [18] А. А. Бабінець, І. О. Рябцев, І. П. Лентюгов, І. І. Рябцев, Т. В. Кайда, і І. Л. Богайчук, «Вплив амплітуди і частоти коливань електродного дроту при дуговому наплавленні на формування і структуру наплавленого металу і проплавлення основного металу,» *Автоматичне зварювання*, № 10, с. 26-33, 2020. <http://jnas.nbu.gov.ua/article/UJRN-0001169548>.
- [19] ДСТУ ISO 6847:2004 (ISO 6847:2000, IDT), *Матеріали зварювальні. Наплавлення валка металу шва для хімічного аналізу*, 2004.
- [20] М. С. Стороженко, О. П. Уманський, В. Є. Шелудько, Ю. В. Губін, і Т. В. Курінна, «Розробка технологій і матеріалів для електроіскрового нанесення покриттів з метою підвищення терміну експлуатації і надійності деталей технологічного і енергетичного обладнання та інструментів,» *Автоматичне зварювання*, № 10, с. 21-24, 2020. <https://doi.org/10.37434/as2020.10.04>.
- [21] С. М. Волощенко, «Створення наукових засад структуроутворення в високоміцному чавуні для підвищення зносостійкості змінних деталей сільгосптехніки та транспорту.» дис. д-ра техн. наук., Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, Київ, 2018.
- [22] K. Lukaszkoicz, "Review of nanocomposite thin films and coatings deposited by PVD and CVD technology," *Nanomaterials*, pp. 145-163, 2011. <https://doi.org/10.5772/25799>.
- [23] J. Musil, "Properties of Hard Nanocomposite Thin Films," *Nanocomposite Thin Films and Coatings*, pp. 281-328, 2007. https://doi.org/10.1142/9781860949975_0005.
- [24] D. K. Dwivedi, "Microstructure and abrasive wear behavior of iron base hardfacing developed by SMA welding," *Material Science and Technology*, vol. 20, no. 10, pp. 1326-1330, 2004.
- [25] J. Grum, "Laser surface hardening," in *Handbook of Metallurgical Process Design*, G. Totten, K. Funatani, and L. Xie, Eds. New York: CRC Press, 2004, pp. 641-731.
- [26] M. Hruska, M. Vostrak, E. Smazalova, and M. Svantner, "Standard and scanning laser hardening procedure," in *Conference Metal 2013 Proceedings*, Ostrava: TANGER, 2013, pp. 1009-1014.
- [27] S. Soundarapandian and N. B. Dahotre, "Laser Surface Hardening," *ASM Handbook*, vol. 4A, *Steel Heat Treating Fundamentals and Processes*, pp. 476-502, 2013.
- [28] S. Nemecek, "Microstructure and properties of cast iron after laser surface hardening," *Materials Engineering – Materlove inžinierstvo*, vol. 20, no. 4, pp. 153-159, 2013.
- [29] F. Mojtahedi, H. Shahverdi, and M. J. Torkamany, "Surface treatment of nano-structured steel with pulsed laser," *Materials Physics and Mechanics*, no. 17, pp. 17-21, 2013.
- [30] E. Kennedy, G. Byrne, and D. N. Collins, "A review of the use of high power diode lasers in surface hardening," *J. Mater. Process. Technol.*, no. 155-156, pp. 1855-1860, 2004.
- [31] M. A. Montealegre, G. Castro, P. Rey, J. L. Arias, P. Vázquez, and M. González, "Surface treatments by laser technology," *Contemporary Materials*, vol. I, no. 1, pp. 19-30, 2010.
- [32] J. D. Majumdar, and I. Manna, "Laser Surface Engineering," in *Handbook of Manufacturing Engineering and Technology*, 2014.
- [33] B. R. Chandra, "Surface Modification of Metals by Using Laser Surface Engineering and Physical Vapor Deposition – A Review," *International Journal and Magazine of Engineering, Technology, Management and Research*, vol. 2, no. 8, pp. 2179-2185, 2015.
- [34] C. P. Paul, B. K. Gandhi, R. Bhargav, D. K. Dwivedi, and L. M. Kukreja, "Cobalt Free Laser Cladding on AISI Type 316L Stainless Steel for Improved Cavitation and Slurry Erosion Wear Behavior," *Journal of Materials Engineering & Performance*, vol. 23, pp. 4463-4471, 2014.
- [35] R. Sallloom, S. S. Joshi, N. B. Dahotre, and S. G. Srinivasan, "Laser surface engineering of B4C/Fe nanocomposite coating on low carbon steel: Experimental coupled with computational approach," *Materials & Design*, vol. 190, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108576>.
- [36] V. Savulyak, et al., "Modification of working surfaces details by processing with laser irradiation," *Proceedings of SPIE. Optical Fibers and Their Applications*. vol. 129850F. 129850F-1-6. 2023. <https://doi.org/10.1117/12.3023443>.
- [37] A. Garcia-Giron, et al., "Combined surface hardening and laser patterning approach for functionalising stainless steel surfaces," *Applied Surface Science*, vol. 439, pp. 516-524, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.01.012>.
- [38] M. Moradi, and M. Moghadam, "High power diode laser surface hardening of AISI 4130; statistical modelling and optimization," *Optics and Laser Technology*, vol. 111, pp. 554-570, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.10.062>.
- [39] T. Slatter, H. Taylor, R. Lewis, and P. King, "The influence of laser hardening on wear in the valve and valve seat contact," *Wear*, vol. 267, pp. 797-806, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2009.01.040>.
- [40] L. Orazi, E. Liverani, A. Ascari, A. Fortunato, and L. Tomesani, "Laser surface hardening of large cylindrical components utilizing ring spot geometry," *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, vol. 63, pp. 233-236, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2014.03.052>.
- [41] A. Zammit, S. Abela, J. C. Betts, and M. Grech, "Discrete laser spot hardening of austempered ductile iron," *Surface & Coatings Technology*, vol. 331, pp. 143-152, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.10.054>.

[42] Z. Zhang, Y. Zhao, J. Shan, A. Wu, H. Gu, and X. Tang, "Influence of heat treatment on microstructures and mechanical properties of K447A cladding layers obtained by laser solid forming," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 790, pp. 703-715, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.03.136>.

[43] W. Napadlek, "Laser percussive strengthening of the aluminum alloys," *Journal of KONES Powertrain and Transport*, vol. 18, no. 1, pp. 373-383, 2011.

[44] В. І. Савуляк і О. В. Шаповалова, «Плазмове гартування робочих поверхонь деталей транспортної техніки,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 1, с. 73-77, 2010. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/1729>.

[45] В. І. Савуляк і О. В. Шаповалова, «Формування високовуглецевих шарів з використанням плазми на поверхнях сталевих деталей для їх зміцнення,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 6, с. 235-238, 2011. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/1600/1600>.

[46] P. Ji, et al., "Optimization strategy for the velocity distribution based on tool influence function non-linearity in atmospheric pressure plasma processing," *Precision Engineering*, no. 65, pp. 269-278, 2020.

[47] C. H. Fu, J. F. Liu, Y. B. Guo, and Q. Z. Zhao, "A comparative study on white layer properties by laser cutting vs. electrical discharge machining of Nitinol shape memory alloy," *Procedia CIRP*, vol. 42, pp. 246-251, 2016.

[48] М. В. Кіяновський, і Н. І. Цивінда, *Електрофізичні та електрохімічні методи обробки поверхонь деталей у машинобудуванні*. Кривий Ріг, Україна: вид-во. центр КТУ, 2011, 412 с.

[49] A. P. Burmak, et al., "Influence of ultrasonic impact treatment on structure and properties of 3D-printed Co-Cr-Mo-W dental alloy," *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, vol. 45, no. 7, pp. 909-934, 2023. <https://doi.org/10.15407/mfint.45.07.0909>.

[50] T. D. Duc, N. V. Thien, H. T. Dung, and T. Q. Hung, "A study on calculating grinding temperature," *Advances in Engineering Research and Application*, vol. 63, ICERA 2018, pp. 84-90, 2019. https://doi.org/10.1007/978-3-030-04792-4_13.

[51] Н. С. Погребна, В. З. Куцова, і Т. В. Котова, *Способи зміцнення металів*, навч. посіб. Дніпро, Україна: НМетАУ, 2021, 89 с.

Рекомендована кафедрою технологій автоматизації машинобудування ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 2.04.2025

Виштак Інна Вікторівна — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри безпеки життєдіяльності та педагогіки безпеки, e-mail: vishtakiv@vntu.edu.ua ;

Кудратов Максат Мелікович — аспірант кафедри технологій автоматизації машинобудування, e-mail: makskudr337@gmail.com .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

I. V. Vishtak¹
M. M. Kudratov¹

Analysis of Methods for Strengthening the Surface Layers of Parts of Gas Bearings

¹Vinnitsia National Technical University

The aim of the work is to analyze the methods for strengthening the surface layers of gas bearings and their impact on durability and reliability during operation.

The study uses a comprehensive methodology that involves the use of general scientific methods of analysis and synthesis, comparative analysis, and a structuring method. Main characteristics of each method are determined, in particular, their impact on microhardness, wear resistance, resistance to high-temperature loads and the formation of an optimal microstructure of the surface layer. Further structuring of materials made it possible to identify the relationship between the technological features of strengthening methods and their effectiveness under high-speed and high-temperature operation of gas bearings. Analysis of scientific publications showed that the combined use of strengthening methods can significantly improve the performance characteristics of bearings, reducing friction and increasing their service life. The practical significance of the analysis of methods for strengthening the surface layers of gas bearings is important, since their durability and operational reliability have a direct impact on the efficiency of high-speed rotary equipment, aviation and energy systems. Considering that gas bearings operate under difficult conditions (high temperatures, significant mechanical loads, intense wear), the choice of the optimal strengthening method is critical to ensure their long and trouble-free operation.

Analysis and use of effective methods for strengthening gas bearings is an important step in increasing their reliability, energy efficiency and durability. This helps to reduce operating costs, improve the operation of high-speed machines and minimize emergency situations, which is critical for many industries.

Keywords: gas bearing, surface layer, strengthening, durability, reliability, performance characteristics.

Vishtak Inna V. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Safety Life and Pedagogical Safety, e-mail: vishtakiv@vntu.edu.ua ;

Kudratov Maksat M. — Post-Graduate Student of the Chair of Technology and Automation of Mechanical Engineering, e-mail: makskudr337@gmail.com