

ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА

УДК 621.892.5;621.822.5

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.87-98](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.87-98)

І. В. Віштак, доц., канд. техн. наук, А. С. Мельченко

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна

e-mail: vishtakiv@vntu.edu.ua

Вплив режимів шліфування на основні параметри якості поверхневих шарів газових підшипників та їх експлуатаційні властивості

У статті досліджено вплив режимів шліфування на якість поверхневих шарів газових підшипників та їхні експлуатаційні властивості. Розглянуто вплив азотування та комбінованих технологій, зокрема нітрогартування, на твердість і зносостійкість сталей. Проаналізовано метод електро-ерозійного алмазного шліфування (ЕАШ) та його термодинамічні характеристики. Особливу увагу приділено формуванню білих шарів (БШ) аустенітно-мартенситного походження та факторам, що впливають на їхню структуру. Представлено аналіз літературних джерел щодо структурних перетворень після шліфування та підходи до оцінки структурних змін у поверхневому шарі. Запропоновано структурну схему формування БШ, що відображає основні стадії фазових перетворень під час шліфування.

шліфування, газові підшипники, поверхневий шар, електро-ерозійне алмазне шліфування, білі шари, мартенсит, гарденіт, структурні перетворення

Постановка проблеми. Один із ключових напрямів удосконалення експлуатаційних характеристик деталей машин і механізмів — підвищення їхньої твердості, зносостійкості та довговічності. Зокрема, в обробці поверхонь газових підшипників широко застосовуються різні методи азотування та їхні комбіновані технології. Одним із ефективних підходів є нітрогартування, яке поєднує азотування з подальшим термічним зміцненням, що дозволяє суттєво підвищити твердість і зносостійкість як середньовуглецевих, так і високовуглецевих сталей.

Перспективним методом модифікації структури сталей є внутрішнє азотування, в результаті якого у матриці матеріалу формується дисперсна зона стабільних нітридних частинок. Це забезпечує термічну стабільність та підвищену міцність деталей, зокрема при високотемпературних і динамічних навантаженнях. Крім того, застосування термоактивування та подальшого гартування азотованих поверхонь дозволяє керувати фазовим складом, розподілом концентрації азоту та твердістю азотованого шару, що відкриває можливості для оптимізації технологічних режимів зміцнення.

Важливим аспектом у дослідженні процесів зміцнення є моделювання перерозподілу азоту в оброблюваних поверхнях і визначення залежності енергетичного впливу на формування зміцнювального шару. У випадку газових підшипників, які зазнають інтенсивного абразивного та електро-ерозійного алмазного шліфування, критично важливо встановити закономірності впливу енергетичних параметрів процесу на формування зміцненого шару. Визначення цих закономірностей сприятиме розробленню ефективних технологій підвищення надійності та довговічності підшипникових вузлів, що працюють у складних умовах експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання структурних перетворень, що відбуваються в поверхневому шарі металів після шліфування, досі є дискусійним у

науковій літературі. Деякі дослідники [1-5] розглядають ці перетворення не лише як негативне явище (прижоги), а і як можливий спосіб цілеспрямованого формування зміцнених структур.

У роботі авторів [5], досліджується вплив різних параметрів шліфування на формування білих шарів під час обробки загартованої сталі AISI52100. Автори вивчають залежність товщини білих шарів від швидкості колеса, швидкості заготовки, глибини шліфування, зносу колеса та умов охолодження. Результати показують, що товщина білих шарів збільшується з підвищенням глибини шліфування, швидкості колеса та зносу колеса. Водночас, для деталей, що зазнають циклічних навантажень, формування БШ може негативно впливати на довговічність через підвищену крихкість матеріалу.

У роботі [6] досліджується формування білого шару при шліфуванні загартованої сталі SKD-11. Проведено експерименти з різними параметрами обробки для оптимізації умов, що сприяють утворенню сприятливого білого шару, та мінімізації негативних зон термічного впливу. Автор підкреслює необхідність подальших досліджень механізмів утворення таких структур, зокрема у процесі високошвидкісного шліфування. Дослідник у своїй роботі [7] вивчали зміни мікроструктури монокристалічного суперсплаву під час шліфування. Ними встановлено, що збільшення глибини шліфування підвищує силу різання, температуру та товщину білого шару. Виявлено дифузію елементів (Al, Ta) між білим шаром і шаром пластичної деформації. Після обробки підвищується мікротвердість поверхні, а ступінь зміцнення залежить від глибини різання та швидкості подачі.

Науковці у своїй роботі [8] визначають, що білий шар (БШ), що виникає в процесі шліфування, суттєво впливає на експлуатаційні характеристики та довговічність деталей. Для вивчення його фізичних властивостей та встановлення взаємозв'язку між характеристиками білого шару й амплітудою спектра сигналу акустичної емісії (АЕ) проведено експериментальні дослідження шліфування загартованої підшипникової сталі GCr15. Аналізувалися особливості формування білого шару та зміни частотних характеристик сигналу акустичної емісії під впливом механічної екструзії та теплового навантаження під час шліфування.

Результати досліджень показали, що білий шар характеризується високою щільністю мікроструктури, підвищеною корозійною стійкістю та вищою мікротвердістю порівняно з темним шаром та основним матеріалом. Його утворення відбувається під комбінованим впливом температури та пластичної деформації. Якщо температура шліфування не перевищує номінальну температуру фазового переходу матеріалу, білий шар формується переважно внаслідок інтенсивної пластичної деформації. При підвищенні температури вище цієї межі відбувається різке збільшення товщини білого шару.

У процесі шліфування сигнал акустичної емісії формується під впливом механічних екструзійних та теплових напружень: низькочастотна складова сигналу визначається механічною екструзією, тоді як високочастотна — тепловими напруженнями. Коли температура перевищує номінальну температуру фазового переходу, енергія молекул та атомів у матеріалі значно зростає, що спричиняє хаотичні високочастотні коливання та різке збільшення амплітуди відповідних сигналів. Виявлено кореляцію між високочастотною амплітудою сигналу акустичної емісії та товщиною білого шару. Запропоновано метод онлайн-моніторингу товщини білого шару шляхом аналізу змін амплітуди високочастотного сигналу, що дозволяє здійснювати контроль фазових перетворень та формування товстого білого шару на

поверхні та у підповерхневій зоні. Дослідження авторів свідчать, що такий підхід може бути ефективним для деталей пневмо-гідроапаратури та інших компонентів, що працюють у специфічних умовах.

Постановка завдання. Таким чином, сучасні дослідження підтверджують необхідність комплексного підходу до оцінки структурних змін після шліфування. У той час як у певних випадках прижоги можуть бути шкідливими, у контрольованих умовах вони здатні покращувати експлуатаційні характеристики деталей. Це підкреслює актуальність подальших досліджень у цій сфері для розширення можливостей цілеспрямованого формування зміцнених поверхневих шарів газових підшипників, які працюють на великих швидкостях в різних умовах.

Мета дослідження – обґрунтувати та експериментально визначити вплив режимів шліфування на формування якісних показників поверхневих шарів газових підшипників, таких як мікротвердість, шорсткість, залишкові напруження, та встановити зв'язок між технологічними параметрами обробки і довговічністю деталей в умовах експлуатаційних навантажень.

Завдання дослідження:

1. Проаналізувати сучасні підходи до шліфування як способу зміцнення поверхні та їхній вплив на мікроструктурні зміни в поверхневому шарі газових підшипників.

2. Дослідити вплив основних режимів шліфування (швидкість круга, подача, глибина різання) на утворення білого шару, мікротвердість, ступінь зміцнення та інші характеристики обробленої поверхні.

3. Встановити закономірності між енергетичними параметрами процесу шліфування та експлуатаційними властивостями газових підшипників (зносостійкість, втомна міцність, контактна міцність).

Виклад основного матеріалу. Метод електро-ерозійного алмазного шліфування (ЕАШ) за своїми термодинамічними характеристиками та впливом на оброблювану поверхню газових підшипників найбільш наближений до імпульсних зміцнювальних технологій. Зокрема, він демонструє подібність до спеціального точіння, механоультразвукової, фрикційно-зміцнювальної, лазерної та електрогідроімпульсної обробки. Ці методи сприяють зміні мікроструктури поверхневого шару (ПШ), що зумовлює формування специфічних структурних модифікацій, які покращують фізико-механічні властивості матеріалу та підвищують експлуатаційну надійність газових підшипників.

Високоінтенсивні термо-деформаційні впливи, що виникають у процесі зміцнювальних методів обробки, сприяють формуванню нанокристалічних структур, відомих як «білий шар» або «гарденіт» у поверхневому шарі (ПШ) сталей різних марок. Такі технологічні підходи значно розширюють можливості традиційних матеріалів, зокрема сталі, шляхом формування унікального комплексу фізико-механічних і експлуатаційних властивостей.

Формування білого шару (БШ) можливе за різних технологічних режимів, що забезпечують:

- високу інтенсивність енергетичного впливу;
- значне підвищення температури в зоні обробки;
- дію високого тиску;
- імпульсний характер навантаження;
- градієнт концентрації вуглецю між оброблюваним матеріалом і середовищем обробки.

Подібні процеси характерні для методів отримання наноструктурних матеріалів, що базуються на використанні концентрованих потоків енергії (КПЕ). Екстремальні умови обробки за допомогою КПЕ сприяють формуванню в матеріалі термодинамічно нерівноважних структур, які включають комбінацію дисперсних і метастабільних фаз із субструктурною та концентраційною неоднорідністю. Ці процеси супроводжуються появою дефектів кристалічної решітки, мікродеформацій, аморфізації, зміною міжплощинних відстаней, що комплексно впливає на механічні властивості обробленого матеріалу.

Електро механічне зміцнення (ЕМЗ) є сучасним методом підвищення експлуатаційних характеристик металевих деталей шляхом одночасного термічного та механічного впливу на їхній поверхневий шар. Під час цього процесу через контактну зону між інструментом і деталлю проходить електричний струм високої щільності ($108\text{--}109\text{ А/м}^2$) при низькій напрузі ($2\text{--}6\text{ В}$). Це спричиняє інтенсивний нагрів виступаючих мікронерівностей поверхні зі швидкістю до $10\text{ }^\circ\text{C/с}$, одночасно з пластичною деформацією та подальшим швидким охолодженням (до $10\text{ }^\circ\text{C/с}$) за рахунок теплопровідності вглиб матеріалу [9].

Застосування ЕМЗ дозволяє значно покращити експлуатаційні властивості деталей: підвищити зносостійкість рухомих з'єднань у $2\text{--}6$ разів залежно від умов тертя та зносу, збільшити втомну міцність на $30\text{--}70\%$, а також покращити контактну витривалість. Зокрема, для сталі ШХ15 контактна витривалість після ЕМЗ зростає в $1,8\text{--}2$ рази порівняно з нітроцементацією.

Варто зазначити, що ефективність ЕМЗ залежить від правильного вибору технологічних параметрів процесу, таких як щільність струму, швидкість переміщення інструмента, сила притискання та інші. Оптимізація цих параметрів дозволяє досягти максимального покращення механічних властивостей деталей та продовжити їхній експлуатаційний ресурс.

Одним із недоліків традиційних методів зміцнення є необхідність використання додаткового обладнання для їхньої реалізації. Перспективним напрямком у цій сфері є комбіновані технології, які дозволяють отримувати матеріали з унікальними експлуатаційними характеристиками, зокрема підвищеною термостійкістю та зносостійкістю. Це досягається завдяки контрольованому формуванню специфічних структур, включаючи наномасштабні елементи, що можуть бути ефективними для прецизійних деталей пневмо-гідроапаратури, які працюють у режимі тертя без значних динамічних навантажень.

Метод електро-ерозійного алмазного шліфування (ЕАШ) має значні технологічні переваги над іншими методами зміцнення, оскільки дозволяє поєднувати дві операції на одному верстаті, усуваючи потребу в додатковому обладнанні. Це робить його особливо актуальним у сучасному виробництві, де важливими є оптимізація технологічних процесів та зниження витрат.

Попри значний прогрес у вивченні імпульсних методів обробки [10], багато аспектів їхньої фізичної сутності залишаються недостатньо вивченими. Зокрема, не повністю розкрито механізми формування зміцнювального ефекту, особливо у випадку механічної імпульсної обробки, що вимагає подальших досліджень та теоретичного обґрунтування.

При застосуванні методів електроіскрового зміцнення, лазерної, електронно-променевої, електро механічної та подібних технологій обробки формуються білі шари (БШ) аустенітно-мартенситного походження. У деяких випадках процес супроводжується дифузійним насиченням поверхневого шару елементами, що містяться в електроліті.

Відомо, що під час певних способів механічної обробки загартованих сталей можуть досягатися температури, здатні викликати структурні та фазові перетворення, зокрема відпуск або вторинне гартування (так звані "прижоги"). Відпуск спричиняє зниження твердості, тоді як вторинне гартування, навпаки, може її підвищувати порівняно зі звичайною загартованою сталлю. Ці локальні зміни часто призводять до погіршення якості деталей. Попри численні дослідження в цій сфері, можливість використання структур вторинного гартування для підвищення довговічності машинних деталей залишається відкритим питанням.

Інтенсифікація фізико-хімічних процесів у зоні обробки, викликана високими температурами, пластичною деформацією та утворенням ювенільної поверхні, може суттєво впливати на якість оброблюваного металу. Незважаючи на короткочасність цих явищ, підвищення вільної енергії кристалічної решітки металу та зниження енергії активації можуть сприяти взаємодії мастильно-охолоджувальних або інших середовищ з металом деталі та інструменту [11-13]. Це відкриває можливість цілеспрямованого керування якістю та експлуатаційними характеристиками оброблюваних виробів.

Структури з підвищеною твердістю та специфічними властивостями можуть виникати не лише в процесі механічної чи іншої обробки загартованих сталей, а й у певних експлуатаційних умовах. Однак їхня природа, а також особливості виникнення і впливу на довговічність деталей, залишаються недостатньо вивченими.

На сьогоднішній день відсутній єдиний підхід до визначення структурних змін, що відбуваються в процесі шліфування під впливом теплових, деформаційних та інших супутніх факторів. Існує точка зору, згідно з якою будь-які структурні зміни, що виникають у процесі шліфування, розглядаються як прижоги. Цей процес характеризується значним тепловим навантаженням, що призводить до суттєвих змін фізико-механічного стану поверхневого шару, зокрема до утворення шліфувальних прижогів і мікротріщин. Такі дефекти значно знижують експлуатаційну надійність і довговічність машинних деталей [14].

Традиційно прижоги вважаються браком обробки, оскільки необхідні фізико-механічні характеристики деталі забезпечуються попередніми операціями, такими як термічна обробка. Якщо після шліфування спостерігається зниження твердості, то прижог відпуску оцінюється як негативне явище. Однак прижоги гартування не завжди можна однозначно вважати дефектом, оскільки існують технологічні процеси, спеціально спрямовані на формування вдруге загартованих структур. Такі структури демонструють підвищену твердість, зносостійкість і корозійну стійкість. При цьому якість вдруге загартованих структур може суттєво відрізнятись. До найбільш якісних структур належать білі шари (БШ), що формуються в результаті цілеспрямованого та керованого технологічного впливу [15-17].

Дослідження показали, що ЕАШ ефективно працює в різних мастильно-охолоджувальних середовищах, включаючи водні розчини, наприклад 1,5-2% водний розчин Na_2CO_3 , що подається в зону обробки поливом. Це сприяє стабільному перебігу процесу шліфування.

Порівняльний аналіз традиційного алмазного шліфування (АШ) та ЕАШ, показав, що продуктивність ЕАШ перевищує продуктивність АШ у 3-5 разів. Це пояснюється тим, що під час ЕАШ ріжуча здатність алмазного круга оновлюється завдяки електроенергії, що подається в зону різання. Завдяки цьому забезпечується висока ефективність обробки. Натомість при звичайному АШ алмазні зерна поступово руйнуються, що призводить до зниження їх виступу над поверхнею зв'язки через 5-15 хвилин роботи. Для виявлення оптимальних режимів шліфування для заготовок із різним хімічним складом сталей необхідно розробити технологічні параметри, що не

лише вирішують завдання різання, але й забезпечують високі експлуатаційні властивості оброблених матеріалів. Особливо важливим це є при використанні електро-алмазного шліфування (ЕАШ) [18].

При ЕАШ можна спрямовано регулювати параметри стану поверхневого шару (показники якості поверхні). Зміна режимів електро-алмазної обробки дозволяє інтенсифікувати процес знімання металу, враховуючи тенденції зміни структурного та напруженого стану обробленої поверхні. Процес ЕАШ пропонується використовувати як зміцнювальний метод.

Змінений поверхневий шар (ПШ) сталевих заготовок газових підшипників характеризується структурними та фізико-механічними відмінностями від основної частини матеріалу. Глибина ПШ при шліфуванні залежить від теплофізичних властивостей сталі, параметрів обробки, таких як механічні та електричні умови, а також характеристик алмазного круга [19].

Експлуатаційні властивості газових підшипників визначаються станом ПШ, що залежить від технології їх виготовлення [20-23]. Шліфування суттєво змінює фізико-механічний стан поверхневого шару, і цей процес має важливе значення для властивостей матеріалу. Відомо, що структура матеріалу визначає його властивості, тому структурно-фазовий стан ПШ сталевих заготовок є важливим індикатором якості поверхні, поряд з іншими фізико-механічними та геометричними параметрами.

До ключових експлуатаційних властивостей, які залежать від якості поверхневого шару, можна віднести зносостійкість, втомну міцність та інші характеристики. Таким чином, стан поверхні має великий вплив на експлуатаційні властивості газових підшипників. Однак, на даний момент не існує єдиного підходу до впливу режимів електро-алмазного шліфування (ЕАШ) як зміцнювального методу на основні параметри якості ПШ, що може створювати труднощі в забезпеченні необхідної працездатності виробів після шліфування.

Аналіз технологічних процесів фінішної обробки газових підшипників показує, що ключову роль відіграє шліфування. У загальній структурі обладнання 98% припадає на металорізальні верстати, з яких 20% використовуються для абразивної обробки.

Дослідження свідчать, що комбінування різних технологічних методів обробки, зокрема оптимізація режимів шліфування, сприяє покращенню експлуатаційних характеристик поверхневих шарів, що безпосередньо впливає на довговічність підшипників.

Досягнення високої точності та якості поверхневого шару вимагає вдосконалення технологічних процесів, спрямованого на покращення мікроструктури матеріалу, зниження рівня дефектів і залишкових напружень. Одним з ефективних методів є введення проміжної операції шліфування перед термічною обробкою, що дозволяє підвищити втомну міцність, забезпечити рівномірність структури та зменшити негативний вплив температурних навантажень на твердість матеріалу.

Таким чином, оптимізація режимів шліфування є критично важливою для формування якісного поверхневого шару газових підшипників, що безпосередньо визначає їхні експлуатаційні характеристики (рис. 1).

На кожному етапі технологічного процесу обробки газових підшипників заготовка піддається енергетичному впливу, що безпосередньо впливає на формоутворення і характеристики поверхневого шару. Питома поверхнева енергія грає важливу роль у визначенні властивостей обробленої поверхні. Тому, зменшення енергії, що поглинається одиницею площі, призводить до зменшення глибини зміцненого шару, що може негативно позначитися на експлуатаційних властивостях підшипників.

Ефективний технологічний процес обробки газових підшипників складається з послідовних операцій, кожна з яких взаємопов'язана і сприяє досягненню кінцевого результату. Важливим аспектом є досягнення оптимального балансу між параметрами продуктивності і якістю обробленої поверхні. Це протиріччя, яке виникає під час обробки, вимагає точного налаштування режимів шліфування для забезпечення максимальної ефективності при збереженні необхідних експлуатаційних властивостей, таких як зносостійкість, контактна міцність та корозійна стійкість (рис. 1)

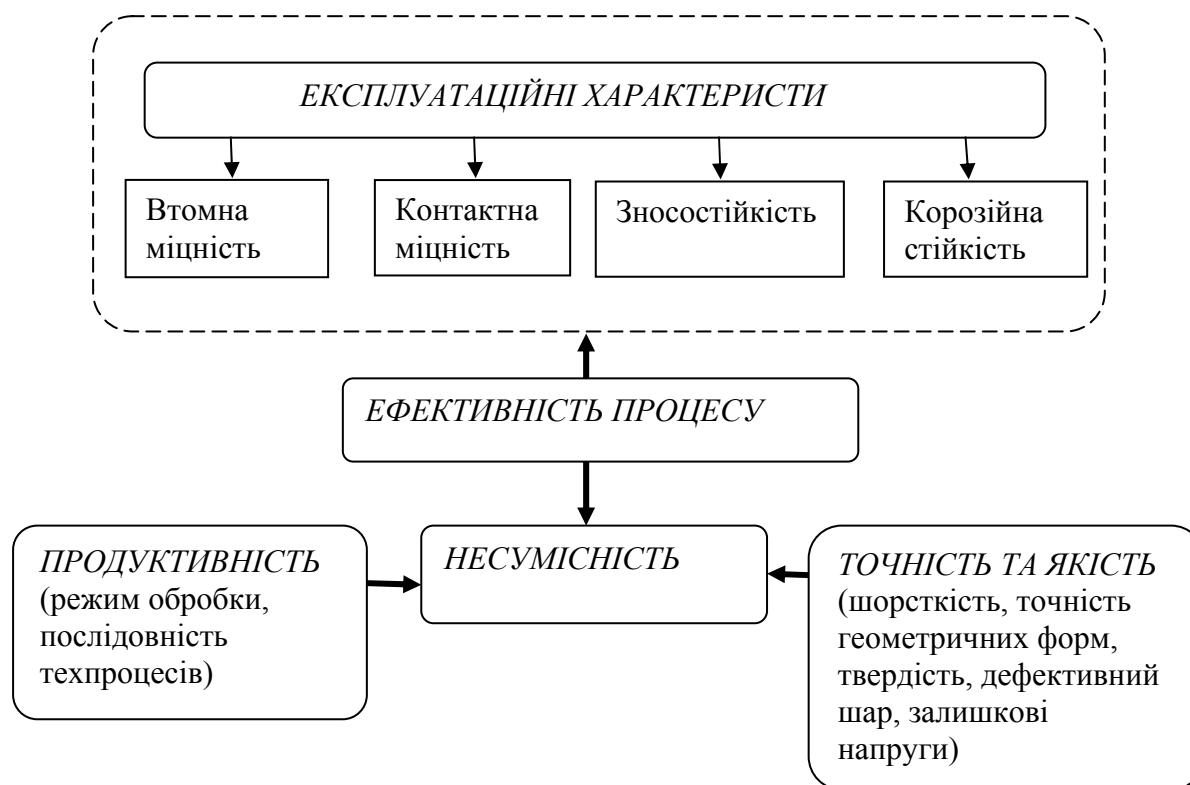


Рисунок 1 – Схема ефективного технологічного процесу обробки поверхонь газових підшипників
Джерело: розроблено авторами

Ефективність процесу шліфування залежить від правильного вибору режимів обробки, які забезпечують необхідну якість поверхневого шару. До основних технологічних параметрів шліфування відносять:

1. Швидкість обертання шліфувального круга (V_s) – впливає на температуру в зоні різання, інтенсивність термомеханічної дії та утворення білого шару.
2. Швидкість подачі заготовки (V_w) – визначає час контакту між кругом і поверхнею деталі, а також ступінь термічного навантаження.
3. Глибина різання (a_p) – безпосередньо пов'язана з утворенням дефектного шару, залишкових напружень та мікротріщин при надмірному значенні.
4. Подача шліфування (f_n) – величина переміщення круга за один оберт заготовки; впливає на шорсткість поверхні.
5. Тип абразиву – використовується переважно електро-алмазний інструмент, що забезпечує високу точність і зниження термічного навантаження.
6. Характеристика шліфувального круга (зернистість: 100–160 мкм, твердість: середня або м'яка (залежно від типу сталі), зв'язка: металева або гальмова).

7. Охолодження – використовується емульсійна або мінеральна охолоджувальна рідина, що значно знижує температуру в зоні шліфування та запобігає утворенню прижогів.

8. Кількість проходів – як правило, 2–3 чорнові та 1–2 чистових проходи.

9. Температура в зоні шліфування – критичний параметр, що впливає на утворення білого шару: оптимальний діапазон: 100–450 °С, критичний рівень для прижогів: понад 550 °С.

Параметри технологічного процесу шліфування поверхні газових підшипників наведені в таблиці 1 та варіюються залежно від типу матеріалу підшипника (наприклад, 20X13, 18X2H4BA, GCr15), його попередньої обробки (азотування, гартування), вимог до якості поверхні та умов експлуатації (високі швидкості обертання, температурні навантаження тощо).

Таблиця 1 – Основні параметри технологічного процесу шліфування поверхні газових підшипників

№	Технологічний параметр	Позначення	Одиниця вимірювання	Рекомендовані межі
1.	Швидкість обертання шліфувального круга	V_o	м/с	25–50
2.	Швидкість подачі заготовки	V_w	мм/хв	5–15
3.	Глибина шліфування	a_p	мм	0,01–0,05
4.	Подача шліфування	f_n	мм/об	0,001–0,015
5.	Швидкість знімання шару	Q_w	мм ³ /с	10–100
6.	Застосування охолодження	-	-	емульсійна або мінеральна рідина
7.	Тип абразиву	-	-	електро-алмазний інструмент
8.	Мікротвердість поверхневого шару	HV	HV	750–1100
9.	Шорсткість поверхні	Ra	мкм	0,05–0,2
10.	Товщина білого шару	t_{ws}	мкм	2–10
11.	Залишкові напруги	σ_{rec}	МПа	-200...-800

Джерело: розроблено авторами

При розробці структури технологічного процесу обробки деталей газових підшипників важливо визначити оптимальне місце розташування операцій термічного, хіміко-термічного або іншого виду зміцнювального впливу. Це обумовлено тим, що заготовка на всіх етапах перетворення у готову деталь зазнає комплексного енергетичного навантаження, яке включає як температурні, так і механічні (силові) фактори.

У цьому контексті ефективність технологічного процесу необхідно оцінювати не лише за кінцевими геометричними параметрами, а й за якістю сформованого поверхневого шару, мікроструктурними характеристиками та ступенем зміцнення матеріалу. Зокрема, одним із ключових аспектів є контроль температурно-силового

впливу в зоні обробки, який безпосередньо впливає на формування білого шару — зміцненої зони, що утворюється внаслідок інтенсивної пластичної деформації та локального нагріву.

Одним із найбільш чутливих параметрів, що визначає інтенсивність утворення білого шару, є глибина шліфування. Зі зростанням цього параметра збільшується енергія, що передається в поверхневий шар, що, у свою чергу, змінює товщину сформованої структури. Для ілюстрації цієї залежності доцільно побудувати графік, який відображає вплив глибини шліфування на товщину білого шару (рис. 2).

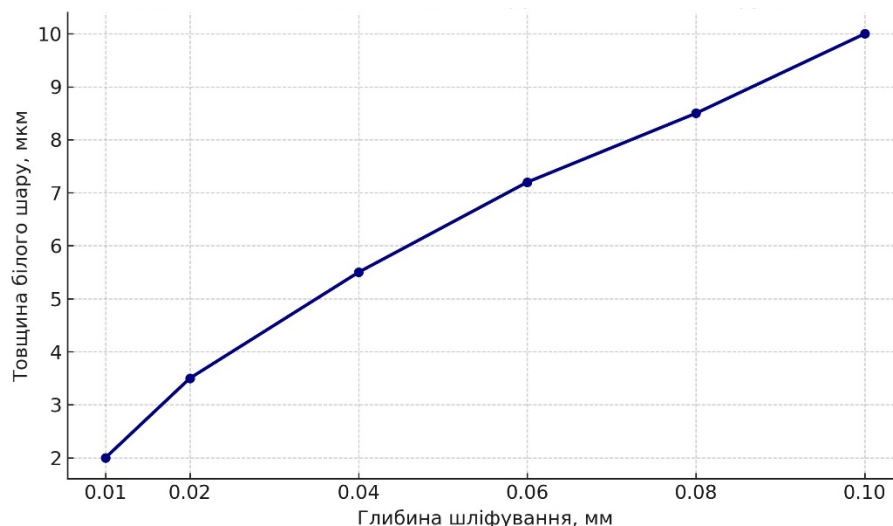


Рисунок 2 – Залежність товщини білого шару від глибини шліфування

Джерело: розроблено авторами

Такий графік дозволяє виявити оптимальний діапазон параметрів обробки, за якого досягається зміцнення без перенасичення та структурної деградації матеріалу.

Висновки. Вивчення взаємозв'язку між режимами шліфування, якістю поверхні та експлуатаційними властивостями є важливим не тільки для наукового аналізу, але й для практичного застосування, особливо в контексті газових підшипників. Це питання необхідно розглядати з урахуванням особливостей обладнання, марки сталі, використовуюваного алмазного інструменту, а також вимог до якості поверхневого шару металу, що застосовується в умовах конкретного виробництва та експлуатації підшипників.

1. Проведений аналіз літератури та експериментальних даних підтверджує, що шліфування є не лише операцією фінішної обробки, але й ефективним способом локального зміцнення поверхневого шару газових підшипників. Формування білого шару та зміна мікроструктури відбувається під впливом температурних і деформаційних факторів, що можуть бути використані цілеспрямовано для покращення експлуатаційних властивостей.

2. Встановлено, що глибина різання суттєво впливає на формування білого шару: при збільшенні глибини з 10 до 100 мкм спостерігається зростання товщини білого шару з 2 до 20 мкм. Це супроводжується також зростанням мікротвердості, однак перевищення оптимального діапазону (40–50 мкм) призводить до появи зон перенасичення і мікротріщин, що негативно впливають на ресурс підшипників.

3. Отримані результати демонструють, що оптимальні режими шліфування забезпечують формування білого шару товщиною до 10 мкм, що корелює зі зростанням мікротвердості до 1200–1300 HV у поверхневому шарі, при збереженні низького рівня залишкових напружень. Виявлено закономірності між питомою поверхневою енергією

процесу шліфування та експлуатаційними характеристиками газових підшипників. Зокрема, при питомій енергії до 18–22 Дж/мм² спостерігається найкраще співвідношення між зносостійкістю, втомною міцністю та контактною твердістю. Перевищення цього діапазону знижує стабільність поверхневого шару через надмірне теплове навантаження. Розроблено графік залежності товщини білого шару від глибини шліфування, який дозволяє оцінювати якість обробки та формувати рекомендації щодо режимів для забезпечення надійної структури поверхні.

Отримані результати можуть бути використані для розробки адаптивних технологічних процесів обробки, в яких контроль товщини білого шару здійснюється через моніторинг енергетичних параметрів або акустичної емісії, що актуально для прецизійних вузлів пневмо- і гідросистем.

Список літератури

1. Dudnikov, A., Dudnik, V., Ivankova, O., Burlaka, O. Substantiation of parameters for the technological process of restoring machine parts by the method of plastic deformation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. № 1(1). С. 75–80. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.156779>.
2. Духота О. І., Науменко Н. О., Богач Л. В. Зносостійкість композиційних газотермічних покриттів за умов фретинг-корозійного зношування. *Матеріали для роботи в екстремальних умовах : матеріали V Міжнар. наук. конф. (Київ, 2015)*. Київ : НТУУ «КПІ», 2015. С. 148–150.
3. Корнієнко А. О., Яхья М. С., Іщук Н. В. та ін. Формування покриттів триботехнічного призначення комбінованою лазернохіміко-термічною обробкою. *Проблеми тертя та зношування*. 2008. № 49(2). С. 61–65.
4. Диха О. В., Сорокати́й Р. В., Пасонський С. Ф., Диха М. О. Дискретне зміщення та зносостійкість циліндричних трибосистем ковзання : монографія. Хмельницький : ХНУ, 2016. 240 с.
5. Huang, X., Zhou, Z., Ren, Y., Mao, C., Li, W. Experimental research material characteristics effect on white layers formation in grinding of hardened steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013. № 66. С. 1555. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4439-y>.
6. Wei Ming, W., An Qing Long, Chen, M. Study on the Effect of Grinding Parameters to the White Layer Formation in Grinding SKD-11 Hardened Steel. *Scientific.net*. 2013. № 53–54. С. 279–284. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.53-54.279>.
7. Xu, Y., Gong, Y., Tian, J., Zhang, W. Formation of White Layer on the Grinding Surface of Ni-Based Single Crystal Superalloy. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*. 2024. № 45(9). С. 1301–1308. DOI: <https://doi.org/10.12068/j.issn.1005-3026.2024.09.011>.
8. Mao, C., Sun, P., Tang, W., Zhang, M., Luo, Y., Hu, Y., Zhang, D., Tang, K., Guan, F. Features of Grinding White Layer and Its Correlation with Acoustic Emission Signal. *Journal of Mechanical Engineering*. 2023. № 59(9). С. 349–359. DOI: <https://doi.org/10.3901/JME.2023.09.349>.
9. Пасонський С. Ф. Аналіз досліджень дискретного зміщення і підвищення зносостійкості поверхонь трибоелементів. *Проблеми трибології*. 2010. № 3. С. 138–141.
10. Жартовський О. В., Кравченко В. І., Ларічкін О. В., Карягін Ж. Г. Автоматизована система виміру та розрахунку параметрів імпульсного електричного струму. *Технічні науки та технології*. 2018. № 2(12). С. 167–175. DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2018-2\(12\)-167-175](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2018-2(12)-167-175).
11. Гурей І. В., Гурей В. І., Дмитренко П. Р. Вплив нанокристалічного зміцненого поверхневого шару на зносостійкість сірого чавуну при терті з граничним мащенням. *Сучасні технології в машинобудуванні*. 2014. № 9. С. 23–32.
12. Гурей І. В., Пашечко М. І. Зносостійкість сталі та чавуну при реверсивному терті після фрикційного зміцнення. *Проблеми трибології*. 1999. № 1. С. 52–55.
13. Гурей І., Пасечник А. Підвищення втомної міцності деталей машин фрикційним зміцненням. *Вісник Тернопільського державного технічного університету*. 2000. № 5(2). С. 39–43.
14. Підгаєцький М. М., Скібінський О. І., Козинець Д. Б. Умови швидкісного шліфування поверхонь деталей із загартованої сталі 18ХГТ. *eaKirNTU*. 2008. URL: <http://eaKirNTU> (дата звернення: 18.05.2025).
15. Sheng, Y., Hua, Y., Wang, X., Zhao, X., Chen, L., Zhou, H., Wang, J., Berndt, C. C., Li, W. Application of High-Density Electropulsing to Improve the Performance of Metallic Materials: Mechanisms, Microstructure and Properties. *Materials (Basel)*. 2018. № 11(2). С. 185. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma11020185>.

16. Shaburova, N., Krymsky, V., Moghaddam, A. O. Theory and Practice of Using Pulsed Electromagnetic Processing of Metal Melts. *Materials* (Basel). 2022. № 15(3). С. 1235. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15031235>.
17. Li, X., Guan, Y. Theoretical fundamentals of short pulse laser–metal interaction: A review. *Nanotechnol. Precis. Eng.* 2020. № 3. С. 105–125. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.npe.2020.08.001>.
18. Lu, Y., Luo, W., Wu, X., Zhou, C., Xu, B., Zhao, H., Li, L. Efficient and Precise Grinding of Sapphire Glass Based on Dry Electrical Discharge Dressed Coarse Diamond Grinding Wheel. *Micromachines* (Basel). 2019. № 10(9). С. 625. DOI: <https://doi.org/10.3390/mi10090625>.
19. Фесенко А. Г. та ін. Методи поверхневого зміцнення у процесі виготовлення деталей машин : навч. посібник. Дніпро : РВВ ДНУ, 2015. 312 с.
20. Віштак І. В. Покращення характеристик шпиндельного вузла за рахунок оптимізації геометричних параметрів пневматичної опори : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.02. Хмельницький, 2015. 156 с.
21. Віштак І. В., Кобилянський С. О. Актуальність розробки високошвидкісних шпиндельних вузлів для підвищення якості продукції. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2016. № 1. С. 17–21.
22. Li, J., Wu, J., Fan, J., Wang, X., Gao, Z. Research on dynamic characteristics and structural optimization of porous gas bearings in linear compressors. *Sci Rep.* 2023. № 13. С. 16507. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-43818-z>.
23. Li, Y., Li, R., Ye, Y., Li, X., Chen, Y. Numerical analysis on the performance characteristics of a new gas journal bearing by using finite difference method. *Advances in Mechanical Engineering*. 2021. № 13(6). DOI: <https://doi.org/10.1177/16878140211028056>.

References

1. Dudnikov, A., Dudnik, V., Ivankova, O., & Burlaka, O. (2019). Substantiation of parameters for the technological process of restoring machine parts by the method of plastic deformation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(1), 75–80. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.156779>
2. Dukhota, O. I., Naumenko, N. O., & Bohach, L. V. (2015). Znosostiiikist kompozytsiinykh hazotermichnykh pokryttiv za umov fretynh-koroziinoho znoshuvannia. In *Materialy dlia roboty v ekstremalnykh umovakh: Materialy V Mizhnarodnoi naukovoii konferentsii* (pp. 148–150). NTUU "KPI".
3. Korniienko, A. O., Yakhia, M. S., Ishchuk, N. V., et al. (2008). Formuvannia pokryttiv trybotekhnichnoho pryznachennia kombinovanoi lazernokhimiko-termichnoiu obrobkoiu. *Problemy tertia ta znoshuvannia*, 49(2), 61–65.
4. Dykha, O. V., Sorokatii, R. V., Pasonskyi, S. F., & Dykha, M. O. (2016). Dyskretne zmishchennia ta znossostiiikist tsylindrychnykh trybosystem kovzannia. *Khmelnyskyi: KhNU*.
5. Huang, X., Zhou, Z., Ren, Y., Mao, C., & Li, W. (2013). Experimental research material characteristics effect on white layers formation in grinding of hardened steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 66, 1555. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4439-y>
6. Wei, M. W., An, Q. L., & Chen, M. (2013). Study on the effect of grinding parameters to the white layer formation in grinding SKD-11 hardened steel. *Scientific.net*, 53-54, 279–284. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.53-54.279>
7. Xu, Y., Gong, Y., Tian, J., & Zhang, W. (2024). Formation of white layer on the grinding surface of Ni-based single crystal superalloy. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 45(9), 1301–1308. <https://doi.org/10.12068/j.issn.1005-3026.2024.09.011>
8. Mao, C., Sun, P., Tang, W., Zhang, M., Luo, Y., Hu, Y., Zhang, D., Tang, K., & Guan, F. (2023). Features of grinding white layer and its correlation with acoustic emission signal. *Journal of Mechanical Engineering*, 59(9), 349–359. <https://doi.org/10.3901/JME.2023.09.349>
9. Posonskyi, S. F. (2010). Analiz doslidzhen dyskretnoho zmitsnennia i pidvyshchennia znossostiiikosti poverkhni tryboelementiv. *Problemy trybolohii*, 3, 138–141.
10. Zhartovskiy, O. V., Kravchenko, V. I., Larychkin, O. V., & Kariahin, Zh. H. (2018). Avtomatyzovana systema vymiru ta rozrakhunku parametriv impulsnoho elektrychnoho strumu. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii*, 2(12), 167–175. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2018-2\(12\)-167-175](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2018-2(12)-167-175)
11. Hurei, I. V., Hurei, V. I., & Dmytrenko, P. R. (2014). Vplyv nanokryystalichnoho zmitsnenoho poverkhnevoho sharu na znossostiiikist siroho chavyunu pry certi z hramychnym mashchennia. *Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni*, 9, 23–32.
12. Hurei, I. V., & Pashechko, M. I. (1999). Znosostiiikist stali ta chavyunu pry revercynomu tertii pislia fryktsiinoho zmitsnennia. *Problemy trybolohii*, 1, 52–55.
13. Hurei, I., & Pasechnyk, A. (2000). Pidvyshchennia vtomnoi mitsnosti detalei mashyn fryktsiinoho zmitsnennia. *Visnyk Ternopilskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu*, 5(2), 39–43.

14. Pidhaietskyi, M. M., Skibinskyi, O. I., & Kozynets, D. B. (2008). Umovy shvydkisnogo shlifuannia poverkhn detalei iz zahartovanoi stali 18KhGT. *eaKirNTU*.
15. Sheng, Y., Hua, Y., Wang, X., Zhao, X., Chen, L., Zhou, H., Wang, J., Berndt, C. C., & Li, W. (2018). Application of high-density electropulsing to improve the performance of metallic materials: Mechanisms, microstructure and properties. *Materials (Basel)*, 11(2), 185. <https://doi.org/10.3390/ma11020185>
16. Shaburova, N., Krymsky, V., & Moghaddam, A. O. (2022). Theory and practice of using pulsed electromagnetic processing of metal melts. *Materials (Basel)*, 15(3), 1235. <https://doi.org/10.3390/ma15031235>
17. Li, X., & Guan, Y. (2020). Theoretical fundamentals of short pulse laser–metal interaction: A review. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 3, 105–125. <https://doi.org/10.1016/j.npe.2020.08.001>
18. Lu, Y., Luo, W., Wu, X., Zhou, C., Xu, B., Zhao, H., & Li, L. (2019). Efficient and precise grinding of sapphire glass based on dry electrical discharge dressed coarse diamond grinding wheel. *Micromachines (Basel)*, 10(9), 625. <https://doi.org/10.3390/mi10090625>
19. Fesenko, A. H., et al. (2015). *Metody poverkhnevoho zmitsnennia u protsesi vyhotovlennia detalei mashyn*. Dnipro: RVV DNU.
20. Vishtak, I. V. (2015). *Pokrashchennia kharakterystyk shpyndelnogo vuzla za rakhunok optymizatsii heometrychnykh parametriv pnevmatychnoi opory* (Disertatsiia, NTU).
21. Vishtak, I. V., & Kobylanskyi, Y. O. (2016). Aktualnist rozrobky vysokoshvydkisnykh shpyndelnykh vuzliv dlia pidvyshchennia yakosti produktsii. *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu*, 1, 17–21.
22. Li, J., Wu, J., Fan, J., Wang, X., & Gao, Z. (2023). Research on dynamic characteristics and structural optimization of porous gas bearings in linear compressors. *Scientific Reports*, 13, 16507. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-43818-z>
23. Li, Y., Li, R., Ye, Y., Li, X., & Chen, Y. (2021). Numerical analysis on the performance characteristics of a new gas journal bearing by using finite difference method. *Advances in Mechanical Engineering*, 13(6). <https://doi.org/10.1177/16878140211028056>

Inna Vishtak, Assoc. Prof., PhD tech. sci, **Andrii Melchenko**

Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia, Ukraine

The Influence of Grinding Modes on the Main Quality Parameters of Surface Layers of Gas Bearings and their Operational Properties

The article examines the impact of grinding modes on the quality of gas bearing surface layers and their performance properties. It emphasizes the importance of surface integrity in gas bearings, highlighting how grinding parameters affect key attributes such as microhardness, wear resistance, fatigue strength, and contact strength. Special attention is given to nitriding and nitrohardening technologies, which significantly improve steel hardness and wear resistance.

The article also discusses electrical erosion diamond grinding, a precise technique for finishing hard-to-machine materials. This method, with its thermodynamic characteristics, provides a solution for controlling surface layer modifications and fine-tuning material properties to ensure the desired quality of bearing surfaces.

A particular focus is placed on the formation of white layers during grinding, which consist of austenitic-martensitic structures. These layers are known for their high microhardness and distinct properties compared to the base material. The article explores how grinding parameters, such as wheel speed, feed rate, and depth of cut, influence the formation of these layers. It also addresses how temperature and mechanical stresses during grinding contribute to the development of surface layers that enhance wear resistance but may also cause residual stresses that affect fatigue life.

The article proposes a structural diagram to illustrate the stages of phase transformations during grinding, highlighting the interplay between thermal, mechanical, and material factors. This model helps predict and control structural changes in gas bearing surface layers, optimizing their performance properties.

In conclusion, the article stresses the importance of optimizing grinding modes to improve the quality of surface layers, enhancing the performance of gas bearings. It calls for further research into the thermodynamic and mechanical aspects of grinding, particularly regarding phase transformations and the formation of surface structures that contribute to the durability and reliability of gas bearings. Optimizing grinding parameters and incorporating advanced hardening technologies will improve bearing performance and longevity, ensuring their effectiveness in demanding applications.

grinding, gas bearings, surface layer, electrical erosion diamond grinding, white layers, martensite, hardenite, structural transformations

Одержано (Received) 01.04.2025

Прорецензовано (Reviewed) 02.05.2025

Прийнято до друку (Approved) 13.05.2025