

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Загребельний Володимир Вікторович



УДК 621.891

**ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПІДВИЩЕНОЇ ЗНОСОСТІЙКОСТІ
ШВИДКОРІЗАЛЬНОЇ СТАЛІ Р6М5 КОМБІНОВАНИМИ МЕТОДАМИ
ПОВЕРХНЕВОГО ЗМІЦНЕННЯ**

Спеціальність 05.02.04 – тертя та зношування в машинах

Галузь знань 13 – механічна інженерія

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному авіаційному університеті.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Лабунець Василь Федорович,
Національний авіаційний університет,
професор кафедри машинознавства
Навчально-наукового Аерокосмічного інституту.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Івченко Леонід Йосипович,
Запорізький національний технічний університет,
директор машинобудівного інституту;

кандидат технічних наук, доцент
Куц Олексій Іванович,
Національний транспортний університет, доцент
кафедри виробництва, ремонту та матеріалознавства.

Захист відбудеться «01» березня 2018 р. о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.062.06 в Національному авіаційному університеті за адресою: 03058, м. Київ, просп. Космонавта Комарова, 1, корп. 11, ауд. 220.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного авіаційного університету за адресою: 03058, м. Київ, просп. Космонавта Комарова, 1, корпус 8.

Автореферат розісланий «__» січня 2018 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
к.т.н., с.н.с.



О. Ю. Корчук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Для вирішення завдання підвищення працездатності і надійності різального інструменту (РІ) потрібно забезпечити йому високу зносостійкість. РІ втрачає свої різальні властивості й виходить з ладу через передчасне зношування робочих поверхонь.

В інструментальному виробництві при виготовленні РІ найпоширенішою є швидкорізальна сталь марки Р6М5. РІ зі сталі Р6М5 використовуються при обробці широкої номенклатури конструкційних матеріалів, таких як леговані сталі, чавуни, кольорові метали, композиційні матеріали та ін. Проте при механічній обробці важкооброблюваних конструкційних матеріалів на високих швидкостях різання, де температура в зоні контакту «РІ – важкооброблюваний матеріал» досягає високих значень і, РІ піддається підвищеному зносу. Тому на його різальні крайки наносять зносостійкі покриття.

Існуючі методи підвищення зносостійкості з використанням одношарових суцільних покриттів не завжди забезпечують необхідні експлуатаційні властивості інструменту. Підвищити зносостійкість РІ за рахунок модифікації поверхневого шару можна шляхом формування комбінованими методами покриттів дискретного та градієнтного типів, але триботехнічні властивості та механізм їх зношування досліджені недостатньо. Відсутні науково обґрунтовані рекомендації щодо вибору раціональної конструкції покриттів і триботехнології їх формування.

Отже, розробка таких перспективних методів комбінованого модифікування поверхневих шарів РІ, які включають дискретну лазерну обробку (ДЛО) і хіміко-термічну обробку (ХТО), ДЛО і іонно-плазмове напилення, створення градієнтних покриттів та дослідження їх фізико-механічних та триботехнічних властивостей є актуальним завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційні дослідження проводилися в межах науково-дослідних робіт Національного авіаційного університету відповідно до тематичних планів Міністерства освіти і науки України: №659-ДБ10 (№ держреєстрації 0110U000212), автором проведено дослідження механізму зношування РІ зміцненого комбінованими методами; №865-ДБ13 (№ держреєстрації 0113U000084) згідно з Державною цільовою програмою прогнозування науково-технологічного та інноваційного розвитку України за напрямом «Найважливіші проблеми фізико-математичних і технічних наук» автором встановлено закономірності зношування РІ з комбінованими покриттями та №1060-ДБ16 (№ держреєстрації 0116U004636) за напрямом «Інженерія поверхні» автором розроблено технологічні процеси формування комбінованих покриттів.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення зносостійкості поверхневих шарів РІ зі швидкорізальної сталі Р6М5 шляхом нанесення комбінованих дискретних і градієнтних покриттів та встановлення закономірностей впливу їх структурно-фазового складу, фізико-механічних властивостей та параметрів структури на триботехнічні характеристики.

Для досягнення поставленої мети було сформульовано такі завдання:

1. Встановити вплив ДЛО на процеси азотування, напружено-деформований стан (НДС) та триботехнічні властивості сталі Р6М5;

2. Встановити закономірності зношування дискретно азотованої сталі Р6М5 в залежності від параметрів дискретної структури покриттів острівного і стільникового типу;

3. На основі комплексних досліджень встановити закономірності зношування багатокомпонентних азотохромованих та азототитанованих покриттів;

4. Розробити технологічний процес формування багатошарового градієнтного покриття (БГП) з високою припрацьовуваністю і зносостійкістю та дослідити його триботехнічні властивості;

5. Встановити закономірності зношування комбінованих покриттів в умовах абразивного зносу при терті не жорстко закріпленими абразивними частками, який має місце при експлуатації РІ;

6. Розробити триботехнологію нанесення іонно-плазмових покриттів, яка дозволить підвищити теплостійкість сталі Р6М5, скоротити операції відпуску, підвищити її зносостійкість, а також дослідити триботехнічні властивості сталі Р6М5 з покриттям TiN, нанесеним за даною технологією.

Об'єкт дослідження – процеси тертя та зношування сталі Р6М5 поверхнево модифікованої комбінованими дискретними та градієнтними покриттями.

Предмет дослідження – закономірності впливу структурно-фазового складу на фізико-механічні і триботехнічні властивості сталі Р6М5, обробленої комбінованими методами.

Методи дослідження. Під час виконання дисертаційної роботи для вирішення поставлених завдань використовувалися сучасні методи досліджень. Для формування зносостійких поверхневих шарів на швидкорізальній сталі Р6М5 було використано методи лазерної обробки (ЛО), ХТО і іонно-плазмового напилення. Дослідження мікроструктури, визначення фазового та хімічного складу зміцнених поверхневих шарів здійснювалися мікроструктурним, рентгеноструктурним і рентгеноспектральним методами. Механічні властивості поверхневих шарів визначали дюрOMETричними методами. Методи інженерної механіки використовувалися для дослідження залишкових напружень, мікротвердості, триботехнічних властивості сталі Р6М5 з комбінованими покриттями в умовах тертя ковзання та не жорстко закріплених абразивних часток. Методи багатофакторного планування експерименту та математичної статистики – для обробки результатів досліджень та виконання оптимізації технологічного процесу нанесення іонно-плазмового БГП за триботехнічними критеріями.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Встановлено закономірності формування структури дискретно азотованої сталі Р6М5, які, на відміну від існуючих, враховують схеми попередньої ЛО та технологічні параметри азотування. Встановлено, що оптимальною площею обробки є 60–75 %, що узгоджується з аналітичними розрахунками НДС;

2. Запропоновано механізм підвищення зносостійкості і стійкості РІ зі сталі Р6М5 за рахунок ДЛО за сітчасто-стільниковою схемою з наступним азотуванням, згідно з яким комбіноване покриття виконує дві функції: тонкий, пластичний, азотований шар на не зміцненій попередньо лазером поверхні екранує безпосередній контакт матеріалів трибоспряження і забезпечує протікання процесу припрацювання з утворенням специфічних вторинних структур з високою стійкістю до

температурно-силових впливів контактного фрикційного процесу. Дискретно зміцнені з високою твердістю азотовані ділянки забезпечують мінімальні напруження при терті та підвищену зносостійкість;

3. Уперше встановлено, що при азототитануванні на сталі Р6М5 формується покриття з шарів карбіду титану TiC та нітриду титану TiN , а при азотохромуванні з шарів карбідів $Cr_{23}C_6$, Cr_7C_3 та нітриду хрому Cr_2N . Показано підвищення зносостійкості в умовах тертя ковзання без змашування та абразивної зносостійкості сталі після азототитанування та азотохромування, при цьому додаткова ДЛЮ підвищує твердість сталі, яка є підкладкою під покриттям і забезпечує сприятливий НДС у системі основа–покриття при терті;

4. Розроблено БГП на основі Ti , Hf , Si та встановлено механізм його зношування. Його висока зносостійкість, на відміну від існуючих, досягається співвідношенням компонентів у верхньому (зовнішньому) підшарі, за рахунок чого забезпечується правило додатнього градієнта механічних властивостей завдяки нижчій твердості і підвищеній пластичності порівняно з нижнім основним підшаром. Зовнішній прошарок утворює вторинні структури з високою стійкістю до температурно-силових впливів контактного фрикційного процесу і створює оптимальні умови для роботи основного матеріалу покриття;

5. Встановлено зв'язок між зносостійкістю комбінованих покриттів в умовах абразивного зношування не жорстко закріпленими частинками і стійкістю РІ при експлуатації; комбіновані покриття з більшою абразивною зносостійкістю забезпечують вищу стійкість РІ. Запропоновано визначати конструктивні параметри покриттів на РІ зі сталі Р6М5 дискретного і градієнтних типів на основі експериментальних досліджень в умовах тертя ковзання і абразивного зношування та результатів розрахунків НДС, що виникає при терті робочої поверхні РІ.

Практичне значення одержаних результатів. Практична цінність роботи полягає у тому, що одержано нові наукові результати, які є основою розробки технологій комбінованого зміцнення РІ зі сталі Р6М5. Це дозволить на етапах розробки і виробництва РІ здійснити вибір раціональних за складом та властивостями покриттів для підвищення його зносостійкості при різанні.

Комбіноване покриття, яке включає ДЛЮ за сітчасто-стіленьковою схемою з наступним азотуванням, дозволило підвищити стійкість РІ зі сталі Р6М5 в 1,7–2,2 рази (акт виробничих випробувань від 02.10.2017).

Розроблено та захищено деклараційними патентами України: спосіб отримання зносостійких покриттів з високою припрацьовуваністю і підвищеним опором втомному руйнуванню (пат № 107190; опубл. 25.05.2016, Бюл. № 10) та градієнтне покриття з високою припрацьовуваністю і зносостійкістю (пат. № 98227; опубл. 27.04.2015, Бюл. № 8).

Розроблена триботехнологія комплексного підвищення експлуатаційних характеристик сталі Р6М5 при нанесенні іонно-плазмового покриття TiN , яка дає змогу підвищити теплостійкість сталі Р6М5 на $20\text{ }^{\circ}C$ та температуру нанесення покриттів до $580\text{ }^{\circ}C$, що є оптимальною для нанесення зносостійких покриттів високої якості (пат. № 99744 заявл. 04.12.2014; опубл. 25.06.2015, Бюл. № 12). Запропонований спосіб нанесення іонно-плазмового покриття TiN використано для зміцнення інструменту при точінні легованої термообробленої сталі ХВГ і дасть

змогу скоротити витрати інструменту при обробці важкооброблюваних легованих сталей та отримати річний економічний ефект у сумі 45 000 гривень на рік (акт реалізації досліджень від 04.09.2017).

Особистий внесок здобувача. Основні наукові положення і практичні результати, які представлені у дисертаційній роботі, отримані автором особисто. Без співавторів опубліковано наукові праці [3, 9, 13]. З наукових праць, опублікованих зі співавторами, використовуються результати, які отримані автором або співавторами за його безпосередньої участі, а саме: досліджено особливості протікання процесів тертя і зношування в триботехнічній системі «РІ – важкооброблюваний матеріал» [1]; проведення експерименту з визначення триботехнічних характеристик досліджуваних покриттів [2, 10, 11, 14]; запропоновано комбіновані методи підвищення зносостійкості РІ зі сталі Р6М5 та досліджено закономірності їх зношування [4]; визначено закономірності зношування сталі Р6М5, зміцненої багатоконпонентними покриттями в умовах тертя ковзання [5]; досліджено закономірності впливу схем ДЛО на триботехнічні властивості сталі Р6М5 [6, 15]; встановлено механізм зношування РІ зі сталі Р6М5 при обробці важкооброблюваних матеріалів [7]; досліджено закономірності зношування та встановлено механізм зношування РІ зі сталі Р6М5 з комбінованим покриттям (ЛО з наступним іонно-плазмовим напиленням) при терті ковзанні без змащування та в умовах абразивного зношування [8, 16]; досліджено НДС поверхонь тертя дискретно азотованих шарів [12]; досліджено фізико-механічні і триботехнічні властивості градієнтного покриття [17].

Апробація результатів дисертаційної роботи. Наукові результати дисертаційного дослідження доповідалися та обговорювалися на міжнародних науково-технічних конференціях і конгресі: Міжнародна науково-технічна конференція студентів та молодих вчених «Політ» (м. Київ, 2012 р.); Міжнародні науково-технічні конференції «АВІА-2013» і «АВІА-2017» (м. Київ, 2013 і 2017 рр.), Міжнародна науково-технічна конференція «Матеріали для роботи в екстремальних умовах-5» (м. Київ, 2015 р.), 5-а Міжнародна науково-технічна конференція «NightMatTech» (м. Київ, 2015 р.), «Сучасні технології в механіці» (м. Хмельницький, 2016 р.), The seventh World congress «Aviation in the XXI-st century» Safety in Aviation and Space Technology (Kyiv, 2016), XVII Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта» (м. Київ, 2016 і 2017 рр.), 17-й Міжнародний науково-технічний семінар «Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте» (м. Свалява, 2017 р.), Науково-технічна конференція студентів, аспірантів, докторантів та молодих учених «Інноваційні технології» (м. Київ, 2017 р.).

В цілому робота доповідалася на засіданні науково-технічного семінару зі спеціальності 05.02.04 – тертя та зношування в машинах 09 листопада 2017 р. протокол № 27.

Публікації. Основні результати дисертаційних досліджень опубліковано у 17 наукових працях, у тому числі: 6 праць у фахових виданнях переліку МОН України; 1 у закордонному виданні; 1 в закордонному виданні, яке внесено до реєстру міжнародної наукометричної бази даних Web of Science; 6 матеріалів та тез доповідей на міжнародних науково-технічних конференціях і конгресі; 3 патенти України.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації, вступу, п'яти розділів, висновків та додатків. Повний обсяг дисертації становить 195 сторінок. Обсяг анотації становить 14 сторінок. Дисертація містить 67 рисунків, 19 таблиць. Список використаних джерел із 197 найменувань займає 20 сторінок. Додаток містить 15 сторінок. Обсяг основної частини дисертації становить 140 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, показано зв'язок роботи з науковими темами, сформульовано мету і завдання досліджень, визначено об'єкт та предмет дослідження, викладено наукову новизну і практичну цінність дисертаційних досліджень, наведено відомості щодо апробації та реалізації досліджень, а також публікації за результатами досліджень.

У **першому розділі** проведено аналіз причин та характеру руйнування РІ із сталі Р6М5 та методів підвищення його зносостійкості. Показано, що довговічність і працездатність РІ в залежності від різних умов експлуатації визначаються зносостійкістю його поверхневих шарів та фізико-хімічними процесами, які виникають при контакті з оброблюваним матеріалом під час механічної обробки. Показано основні види зношування, які виникають при експлуатації РІ та призводять до передчасного виходу його ладу.

З проведеного аналізу літератури сучасних технологічних методів зміцнення поверхневих шарів РІ визначено, що нанесення на його поверхні зносостійких покриттів є практичним, ефективним і доступним способом поліпшення різальних і триботехнічних властивостей, проте одношарові покриття не дозволяють повною мірою забезпечити комплекс необхідних експлуатаційних і фізико-механічних властивостей. Однак, найперспективнішим методом зміцнення поверхневих шарів РІ є створення комбінованих методів нанесення покриттів, внаслідок чого будуть поєднуватися переваги кожного з методів, що надасть можливість підвищити його експлуатаційні й триботехнічні властивості.

У своїх наукових працях автори В.С. Антонюк, А.С. Верещака, Л.Ф. Головка, С.М. Григор'єв, М.В. Кіндрачук, С.А. Клименко, Г.І. Костюк, В.Ф. Лабунець, Б.А. Ляшенко, В.П. Табаков, В.Г. Хижняк, та ін. досліджували властивості та обґрунтували перспективи використання дискретних, багатошарових і градієнтних покриттів на різних типах сталей.

Визначено, що ДЛО можна забезпечити необхідні показники зносостійкості та сприятливій НДС покриття, а також можливості керування його характеристиками за рахунок зміни структури та фізико-механічних властивостей поверхневих шарів. За рахунок нанесення зносостійких покриттів методами ХТО, зокрема, багатокомпонентною дифузійною металізацією можна отримати комплекс необхідних властивостей, що призведе до підвищення зносостійкості РІ із сталі Р6М5 за різних експлуатаційних умов. За рахунок градієнтних покриттів можна покращити механічні й триботехнічні властивості та забезпечити низький коефіцієнт тертя, високу теплостійкість, підвищити адгезійну стійкість покриття з інструментальною основою та зменшити хімічну взаємодію в системі «покриття – оброблюваний матеріал».

Виходячи з результатів проведеного аналізу літератури сформульовано мету та завдання дослідження.

У другому розділі описано методи, методики та експериментальні установки, які використані при проведенні дисертаційного дослідження.

ЛО здійснювали на установці «ЛАТУС-31» з використанням таких режимів: потужність випромінювання – 0,9–1,1 кВт, діаметр ділянки фокусування променя – 5 мм, швидкість пересування лазерного променя – 0,5–1,2 м/хв. Дифузійне азотування проводили за відомою технологією в середовищі аміаку в шахтній печі за температури 540 °С, час витримки 1–36 год. Дифузійну металізацію титаном і хромом – у замкнутому реакційному просторі в установці на базі шахтної печі СШОЛ. Іонно-плазмові та БГП покриття наносили на установці типу «Булат».

Фазовий склад покриттів на сталі Р6М5, сформованих комбінованими методами, визначали шляхом аналізу поверхнь зразків на рентгенівському дифрактометрі ДРОН УМ-1.

Мікрорентгеноспектральний аналіз проводили за допомогою мікроскопа РЕМ-106И. Мікроструктурні дослідження проводили шляхом вивчення та фотографування на мікроскопі МИМ-8 з приставкою Digital camera DCM 130. Мікротвердість визначали на приладі ПМТ-3.

Математичне моделювання проводили за такими етапами: формалізація завдання, побудова плану експерименту, проведення експерименту та попередній статистичний аналіз його результатів, побудова математичних моделей за результатами експерименту, аналіз якості моделей, проведення розрахункового експерименту з використанням побудованих моделей, формування висновків та рекомендацій.

Дослідження зносостійкості комбінованих покриттів в умовах тертя ковзання без змащування проводили на машині тертя СМЦ-2 у парі із загартованою сталлю Р6М5 (HRC 63–65) за схемою ролик–ролик. Визначали масовий знос зразка на електронних вагах AXIS з точністю до четвертого знаку, а також розраховували величину коефіцієнта тертя.

Випробування на абразивну зносостійкість проводили в умовах не жорстко закріплених абразивних частинок різної твердості на випробувальній установці, яка використовується для порівняльного оцінювання зносостійкості матеріалів і покриттів у відповідності з ГОСТ 23.208–79.

Випробування на стійкість РІ зі сталі Р6М5 з комбінованими покриттями проводили на токарно-гвинторізальному верстаті моделі 1Е61М при точінні заготовок із сталі 30ХГСА та ХВГ з охолодженням. Критерієм зношування слугувала фаска зносу по задній грані шириною 0,6 мм. Швидкість різання 2,25 м/с, подача – $S = 0,25$ мм/об, глибина різання – $t = 0,5$ м.

У третьому розділі наведено структурно-фазовий склад, фізико-механічні і триботехнічні властивості сталі Р6М5 після азотування та попередньої ДЛО з наступним азотуванням.

У результаті проведених досліджень встановлено, що поверхневий азотований шар сталі Р6М5 складається з дифузійного підшару – зони внутрішнього азотування – і нітридної поверхневої зони – зони сполук. Товщина отриманого азотованого шару становила 320 мкм. Максимальна мікротвердість азотованого шару – 10,5 ГПа та плавно зменшується до рівня вихідної матриці.

Характерним у змінах зеренної структури сталі Р6М5 після попередньої ДЛЮ є те, що відбувається подрібнення вихідної структури зерен. При цьому зростає протяжність границь зерен і площа та активна здатність їх поверхні завдяки цьому відбувається прискорення дифузії атомів азоту в поверхневий шар сталі. Після ДЛЮ на поверхні сталі Р6М5 формується твердий азотований шар, який містить нітрид Fe_4N та дрібнодисперсний нітрид Cr_2N .

Унаслідок дослідження впливу ДЛЮ на товщину азотованого шару встановлено, що ДЛЮ впливає на дифузію атомів азоту протягом першої години насичення, а також те, що за 1 год. азотування після ДЛЮ можливо отримати більшої товщини азотований шар, ніж при одному азотуванні за 10 год.

З метою формування вимог до створення дискретно азотованих поверхонь було виконано аналітичні розрахунки НДС, що виникає при терті. Визначалися залежності максимальної концентрації зсувних напружень від вмісту зміцнюючих ділянок для сталі Р6М5 у вихідному стані ($E_f = 2,1 \cdot 10^5$ МПа, $G_f = 0,8 \cdot 10^5$ МПа, $V_f = 0,27$), після ДЛЮ ($E_f = 2,2 \cdot 10^5$ МПа, $G_f = 1,0 \cdot 10^5$ МПа, $V_f = 0,2$) і після ДЛЮ з наступним азотуванням ($E_f = 2,5 \cdot 10^5$ МПа, $G_f = 1,2 \cdot 10^5$ МПа, $V_f = 0,15$). На основі аналізу отриманих залежностей, підтверджених експериментально, встановлено, що в умовах тертя слід віддавати перевагу 60–75 % зміцнюючих ділянок (ДЛЮ з наступним азотуванням) при яких спостерігаються мінімальні локальні дотичні напруження у сталі після комбінованої обробки.

Для того щоб підвищити зносостійкість сталі Р6М5 з комбінованим покриттям (ДЛЮ + азотування), ЛО здійснювали дискретно за островною та сітчасто-стілньковою схемами з кроком 3–5 мм. На рис. 1 зображено схеми ДЛЮ. Відстань 3–5 мм між ділянками ДЛЮ обумовлена оптимальною площею обробки – 60–75 % від загальної площі зміцнюваної поверхні.

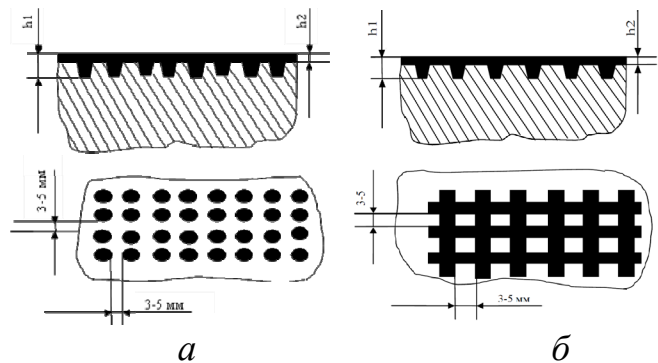


Рис. 1. Схеми ДЛЮ:
а – островна; б – сітчасто-стілнькова

Зразки зі зміцненою поверхнею піддавали азотуванню. Поєднання ділянок з різною твердістю і товщиною покриття створює такий НДС, який забезпечує мінімальні напруження при терті. Площа обробки 60–75 % забезпечує високу зносостійкість при допустимому навантаженні.

Товщина та мікротвердість азотованого шару на сталі становила: на ділянках з ДЛЮ – 0,32 мм (h_1) та 11,8 ГПа і на ділянках без ДЛЮ – 0,15 мм (h_2) та 10,3 ГПа.

Унаслідок дослідження впливу структурно-фазового і хімічного складу на зносостійкість сталі Р6М5 після ДЛЮ з наступним азотуванням було встановлено наявність кисню і заліза, які утворюють оксиди.

Наявність на поверхні тертя вторинних структур покращує умови тертя, підвищує абразивну зносостійкість сталі Р6М5.

Проведені випробування на зносостійкість в умовах тертя ковзання без мащення показали, що попередня ДЛЮ за сітчасто-стілньковою схемою забезпечує вищі триботехнічні характеристики РІ зі сталі Р6М5 (рис. 2), абразивна зносостійкість та стійкість при точінні сталі 30 ХГСА є також вищою.

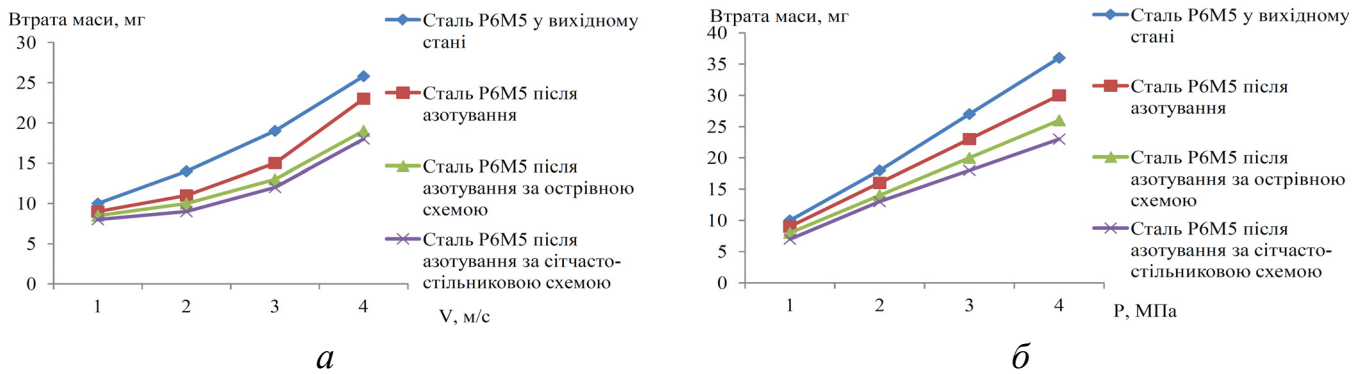


Рис. 2. Залежність величини зносу сталі Р6М5 після ДЛО та азотування від швидкості ковзання (а) та навантаження (б)

У результаті мікроскопічних досліджень встановлено, що на поверхні тертя РІ зі сталі Р6М5 після точіння сталі 30ХГСА є прояви абразивного і втомного зношування, які полягають у втисненні абразивної частинки, дряпання і виривів поверхневих шарів РІ та утворення і поширення тріщин (рис. 3).

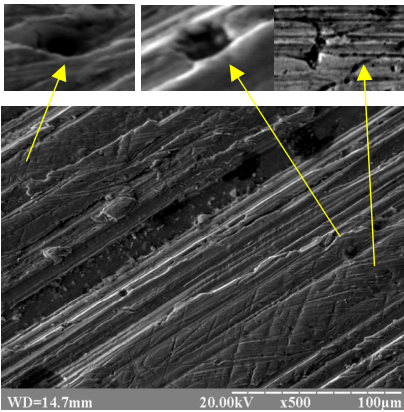


Рис. 3. Поверхня тертя РІ зі сталі Р6М5, зміцненої ДЛО, та азотуванням точіння сталі 30ХГСА, х 500

карбідні фази $Cr_{23}C_6$, Cr_7C_3 та нітрид хрому Cr_2N . Встановлено, що високу мікротвердість та мікрокрихкість має азототитановане покриття, водночас азотохромоване характеризується меншою мікротвердістю і мікрокрихкістю.

При дифузійній металізації дещо знижується твердість сталі. Тому зразки після азототитанування та азотохромовування піддавали ДЛО з метою загартування сталі як підкладки під покриттями. У результаті випробувань в умовах тертя ковзання без змащування встановлено підвищення зносостійкості і зменшення коефіцієнту тертя сталі з багатокомпонентними покриттями з додатковою ДЛО порівняно з азотованою сталлю (рис. 4). ДЛО підвищує зносостійкість в 1,5–1,7 разу порівняно з покриттями без ЛО. Азототитановане покриття має більшу твердість поверхневих шарів, а також має вищу міцність зчеплення з основою. Азотохромоване відзначається низьким коефіцієнтом тертя та вищою пластичністю. ДЛО забезпечує рівномірний розподіл навантаження в системі «сталь–покриття» та слугує міцною основою для покриття, підвищуючи його працездатність при високих умовах експлуатації, зменшуючи його продавлювання, викришування та відшарування.

Загалом, можна сказати, що ДЛО з наступним азотуванням на швидкорізальних сталях зменшує розвиток процесів схоплення та адгезійного зношування, забезпечує підвищення їх зносостійкості при механічній обробці легованих сталей.

У четвертому розділі наведено результати досліджень фізико-механічних і триботехнічних властивостей сталі Р6М5 після комбінованої обробки – азотування з наступним титануванням та азотування з наступним хромуванням.

Рентгеноструктурним аналізом виявлено, що в структурі після азототитанування формуються дві окремі фази: карбід титану TiC та нітрид титану TiN , а після азотохромовування утворюються дві

Металографічним та рентгеноспектральним аналізами поверхонь тертя сталі Р6М5 з багатокомпонентними покриттями було встановлено, що відбувається формування вторинних структур за рахунок матеріалу покриття, які покращують процеси тертя і сприяють підвищенню зносостійкості.

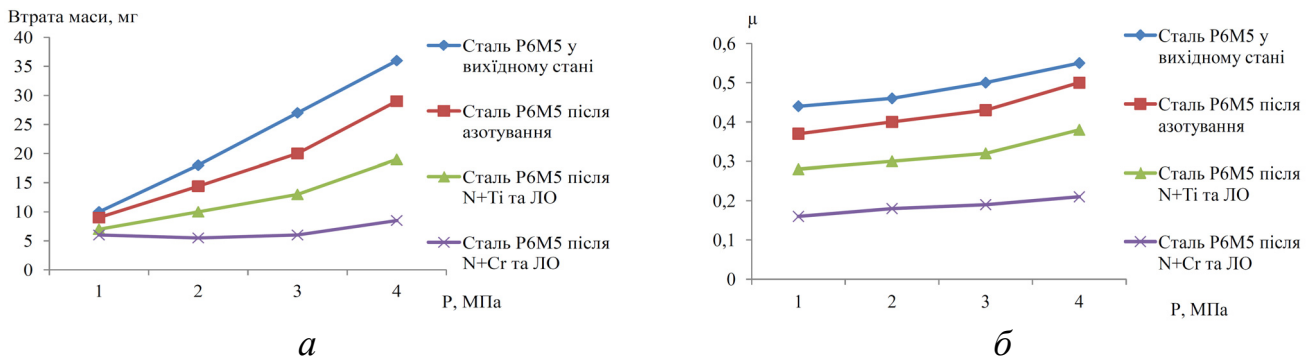


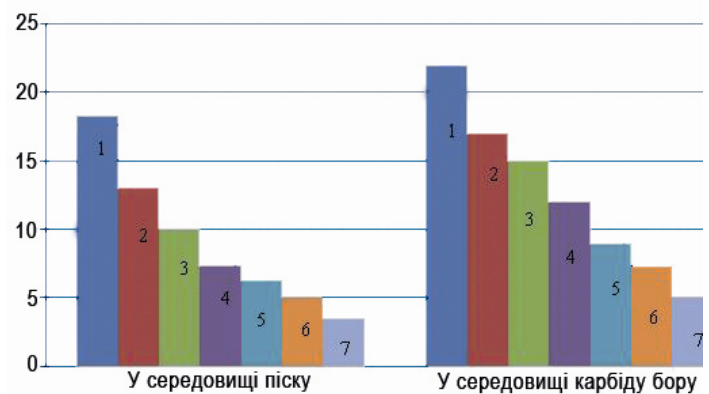
Рис. 4. Зносостійкість (а) і коефіцієнт тертя (б) сталі Р6М5 в залежності від виду обробки і навантаження

Унаслідок дослідження абразивної зносостійкості сталі Р6М5 після азототитанування та азотохромовування в умовах не жорстко закріплених частинок з різною твердістю опосередковано можна сказати, що спостерігається кореляція між зносостійкістю в умовах тертя та ковзання і абразивною зносостійкістю. Азотохромоване покриття має кращу зносостійкість за рахунок більшої твердості і пластичності (рис. 5).

У результаті дослідження стійкості РІ зі сталі Р6М5 з багатокомпонентними покриттями при точінні заготовок зі сталі 30ХГСА встановлено, що стійкість азототитанованих та азотохромованих пластин вища, ніж стійкість азотованих пластин у 1,7 та 2,0 рази відповідно, у порівнянні з азотованою сталлю, а у порівнянні зі сталлю у вихідному стані у 3,0–3,5 раза.

Рис. 5. Абразивна зносостійкість сталі Р6М5 в залежності від виду обробки та твердості абразиву:

- 1 – вихідна сталь Р6М5;
- 2 – азотування;
- 3 – азотування+ЛО;
- 4 – азототитанування;
- 5 – азототитанування+ЛО;
- 6 – азотохромовування;
- 7 – азотохромовування+ЛО



Завдяки поєднанню оптимальної твердості та пластичності багатокомпонентні покриття зменшують знос РІ та знижують схильність до схоплення з оброблюваним матеріалом, зменшують налипання. Тим самим покращується якість обробленої поверхні. За рахунок зниження коефіцієнта тертя в зоні контакту покриття з оброблюваним матеріалом знижується температура різання.

У п'ятому розділі розроблено технологічні процеси формування градієнтного покриття на основі Ti, Hf, Si та триботехнології комплексного підвищення експлуатаційних характеристик сталі Р6М5 при нанесенні іонно-плазмового покриття TiN, досліджено їх механізм зношування та триботехнічні властивості.

Відомо, що РІ, як і будь-який об'єкт трибоспряження, піддається структурній пристосовуваності. Вторинні структури, що утворюються на етапі припрацювання на робочих поверхнях інструменту, значною мірою визначають його подальшу зносостійкість, тобто працездатність інструменту визначається як вихідною структурою матеріалу, так і станом контактних шарів, сформованих на початковому (припрацювання) періоді експлуатації. Тому, для підвищення припрацювання та зносостійкості сталі Р6М5 було розроблено технологічний процес нанесення БГП.

Структура БГП складалася з нижнього шару, який було нанесено безпосередньо на поверхню інструментальної основи товщиною 0,5 мкм із Ті, і верхнього шару покриття товщиною 5,0 мкм із нанокристалічних нітридів Ті, Нf та Si, який, в свою чергу, складається з двох прошарків – зовнішнього (0,3 мкм) і нижнього (4,7 мкм). Завдяки градієнтній структурі покриття на РІ досягається хороші припрацювання і зносостійкість. Адже відомо: для існування зовнішнього тертя потрібно забезпечити додатній градієнт механічних властивостей, згідно з яким зсувний опір у зоні контакту твердих тіл повинен бути меншим, ніж на деякій глибині. Менший зсувний опір забезпечується за рахунок співвідношення компонентів у зовнішньому підшарі завдяки нижчій твердості й підвищеній пластичності порівняно з нижнім основним підшаром.

Триботехнічні випробування в умовах тертя ковзання без змащування показали збільшення зносостійкості сталі Р6М5 із запропонованим БГП у 2,3–2,7 разу порівняно з сталлю Р6М5 з покриттям TiN, коефіцієнт тертя зменшився у 1,6–1,9 разу (рис. 6). Підвищення абразивної зносостійкості досягається за рахунок складу та градієнтної структури покриття, а зносостійкість дослідженого матеріалу визначається природою і твердістю абразиву. Стійкість різальних пластин з БГП збільшилась у 2,1 разу порівняно з покриттям TiN та у 3,4 разу без покриття при точінні заготовок зі сталі марки ХВГ.

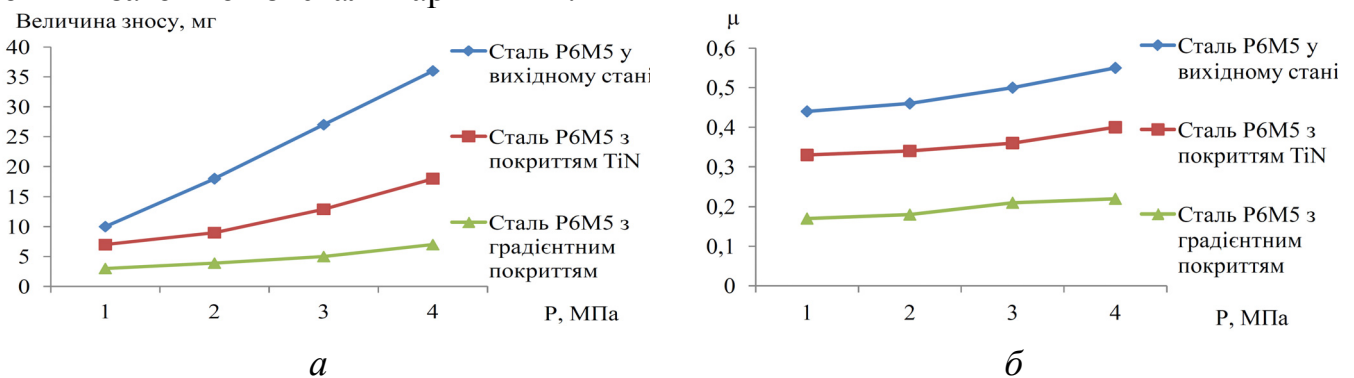


Рис. 6. Зносостійкість (а) і коефіцієнт тертя (б) сталі Р6М5 в залежності від виду обробки і навантаження

За результатами експерименту було проведено статистичний аналіз та побудовано регресійні моделі залежностей критеріїв оптимізації – величини вагового зносу (Y_1) та коефіцієнту тертя (Y_2) від конструктивних, технологічних та експлуатаційних факторів:

$$Y_1 = 3,72601 + 1,72347x_4 - 0,0425083x_1^2x_4x_5^2;$$

$$Y_2 = 0,155762 - 0,037136x_4 - 0,01064483x_1^2x_4^2x_5^2.$$

Перевірка отриманих моделей за критеріями математичної статистики підтвердила їх адекватність, відтворюваність та інформативність. Наочне уявлення про графічний образ функції відгуку одержано внаслідок побудови відповідних геометричних поверхонь (рис. 7).

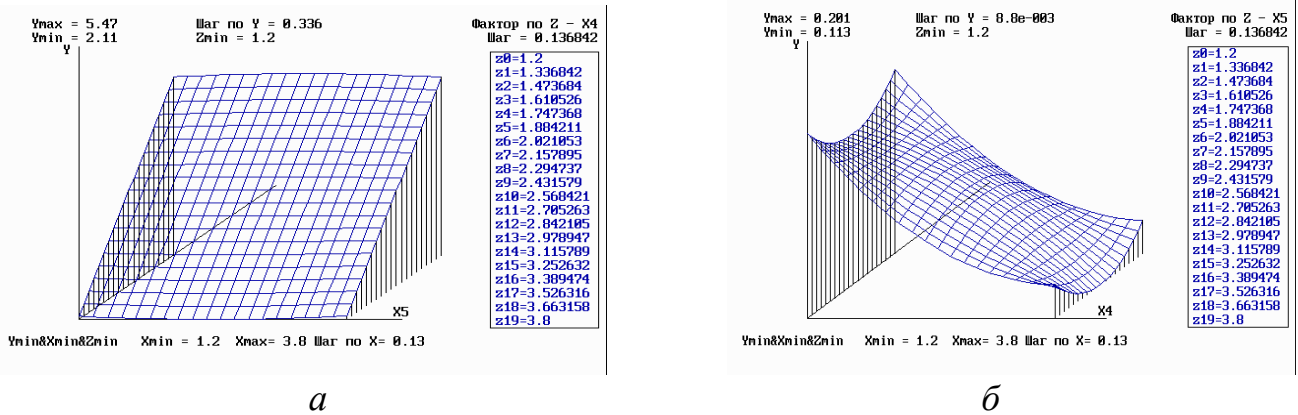


Рис. 7. Графіки дослідження поверхонь відгуку $Y_1 = f(X_4, X_5)$ (а) і $Y_2 = f(X_4, X_5)$ (б) в тривимірному просторі

У результаті проведеної багатокритеріальної оптимізації з використанням одержаних математичних моделей (компроміс за Парето), було знайдено найоптимальніше поєднання рівнів конструктивних та технологічних факторів, що впливають на критерії оптимізації.

Установлено механізм зношування БГП РІ зі сталі Р6М5 при взаємодії з оброблюваним матеріалом. Механізм зношування відбувається при протіканні процесів втомного зношування та/або під дією абразивних часток, що утворюються з самого покриття при викришуванні з можливим адгезійним руйнуванням. У таких умовах відбувається хімічна взаємодія між РІ, оброблюваним матеріалом і навколишнім середовищем. На етапах процесу зношування БГП значну роль відіграють хімічні елементи Ti, Hf, Si та їх нанокристалічні нітриди, які вносять особливості та відповідні їм зміни в процес зношування нижнього та зовнішнього підшарів верхнього шару з одночасним зниженням інтенсивності зношування. У цих випадках механізм зношування, в основному, буде визначатися фізико-механічними властивостями елементів Ti-Hf-Si-N та їх сполук, що утворюються у сформованих покриттях, та пов'язане з ним абразивне та/або адгезійне руйнування з мінімізацією протікання трибохімічних процесів.

Розробка триботехнології комплексного підвищення експлуатаційних характеристик сталі Р6М5 при нанесенні іонно-плазмового покриття TiN. Технологічна операція нанесення іонно-плазмових покриттів полягає у тому, що при зміцненні РІ із швидкорізальної сталі Р6М5 суміщується операція нанесення покриття з процесом одноразового відпуску інструменту при температурах 560–580 °С. Попередньо перед нанесенням покриття невідпущений після гартування РІ піддають ДЛЮ в режимі оплавлення зі щільністю зміцнених ділянок 75 % від загальної площі поверхні РІ. Поєднання ділянок із різною твердістю за рахунок ДЛЮ дає можливість релаксувати напруження, викликані силами тертя в покритті. Площа обробки 75 % дає змогу створити такий НДС, який забезпечує мінімальні напруження при терті, що встановлено аналітичними розрахунками, а також підтверджено експериментально

підвищенням зносостійкості. При цьому підвищується твердість і теплостійкість сталі на 20 °С внаслідок насичення матриці легуючими елементами при розчиненні карбідів. Це дозволяє підвищити до 580 °С температуру відпуску, що є оптимальною для нанесення зносостійких покриттів високої якості.

Триботехнічні випробування в умовах тертя ковзання без змащування показали збільшення зносостійкості сталі Р6М5 із покриттям TiN, нанесеним за запропонованою технологією в 1,5–1,8 разу ніж сталі з покриттям TiN, нанесеним за типовою технологією та у 2,7–3,0 рази більша, ніж сталі без обробки, коефіцієнт тертя зменшується у 1,2–1,5 рази та у 1,5–1,8 разу відповідно (рис. 8).

Результати на абразивну зносостійкість також показують збільшення зносостійкості даної технології за рахунок більшої твердості інструментальної основи і покриття.

Стійкість різальних пластин зі сталі Р6М5 з покриттям TiN, нанесеним за запропонованою технологією, при точінні заготовок сталі 30ХГСА є вищою в порівнянні із типовою технологією у 1,8 рази та у 2,8 у порівнянні з пластинами без покриття.

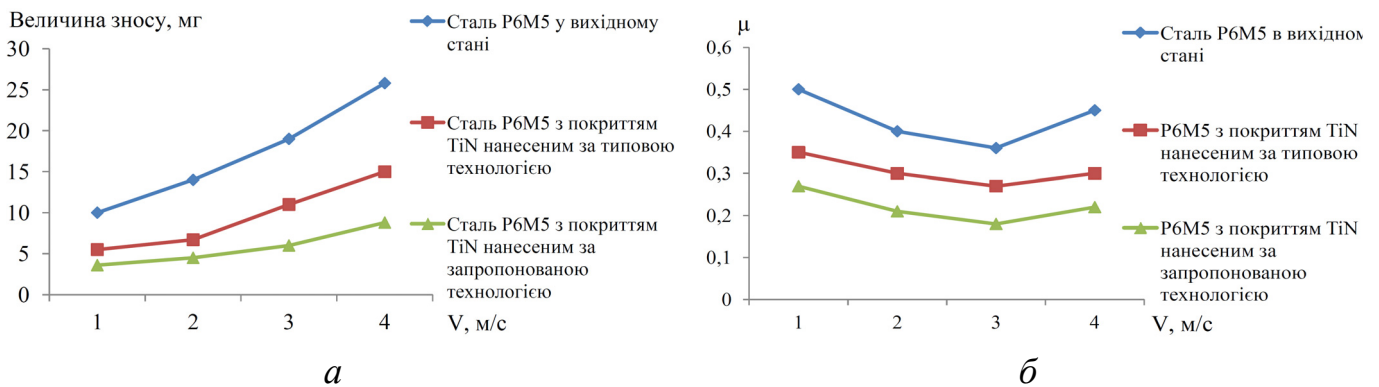


Рис. 8. Величина зносу (а) і коефіцієнта тертя (б) сталі Р6М5 в залежності від виду обробки і швидкості

Дослідження поверхонь тертя зразків зі сталі Р6М5 свідчать про те, що характер і величина зносу залежать від зовнішніх факторів. За невеликих швидкостей ковзання і питомого тиску величина зносу незначна, що обумовлено протіканням окислювального процесу зношування. На рис. 9 показано поверхню тертя сталі Р6М5 з покриттям TiN, нанесеним за запропонованою технологією.

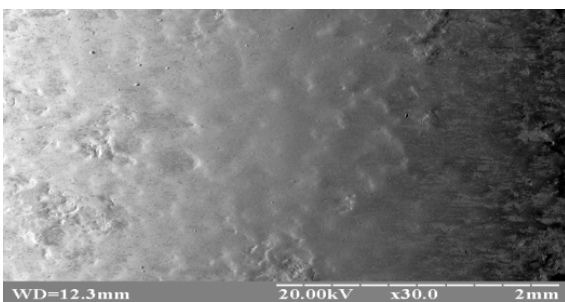


Рис. 9. Поверхня тертя сталі Р6М5 з покриттям TiN нанесеним за запропонованою технологією при випробуванні в умовах тертя ковзання, х 30

Вторинні структури, що виникають на поверхні сталі, розташовуються по всій робочій поверхні, що контактує з контртілом. При терті сталі Р6М5 без покриття на її поверхні розвивається механо-хімічний вид зношування і супутній йому абразивний. Характерними абразивними «борознами» характеризується поверхня тертя сталі Р6М5 без покриття, а з покриттям, нанесеним за запропонованою технологією, спостерігається більш рівна поверхня – розвивається окислювальне зношування (рис. 10).

ВИСНОВКИ

У результаті проведених дисертаційних досліджень розв'язано актуальне наукове завдання, яке полягало у підвищенні зносостійкості поверхневих шарів швидкорізальної сталі Р6М5 комбінованими методами та встановлення закономірностей впливу їх структурно-фазового складу, фізико-механічних властивостей та параметрів структури на триботехнічні характеристики. Розв'язанню поставленого завдання сприяє впровадженню перспективних технологічних процесів модифікації поверхневих шарів РІ у виробництво і дозволяє значно підвищити його триботехнічні властивості та зменшити витрати.

На основі отриманих наукових та практичних результатів зроблено такі висновки:

1. Уперше розроблено технологічні процеси зміцнення поверхневих шарів сталі Р6М5 попередньою ДЛЮ і наступним азотуванням і досліджено особливості їх структуроутворення. Показано, що ЛЮ дозволяє прискорити процеси дифузії атомів азоту в поверхневі шари сталі Р6М5, а також зменшити крихкість та збільшити твердість азотованого покриття. Аналітичними розрахунками НДС встановлено, що в умовах тертя можна застосовувати 60–75 % зміцнюючих ділянок (ДЛЮ з наступним азотуванням), при яких спостерігаються мінімальні локальні дотичні напруження у сталі після комбінованої обробки. Дані результати узгоджуються з експериментальними дослідженнями;

2. Установлено, що вищі зносостійкість в умовах тертя ковзання і стійкість РІ зі сталі Р6М5 забезпечує сітчасто-стільникова схема в порівнянні зі схемою острівного типу. Це обумовлено тим, що дискретні ділянки з різною твердістю і товщиною сприяють кращій припрацьовуваності покриття і мінімізують напруження при терті. Зносостійкість збільшується у 1,5–1,7 разу, коефіцієнт тертя зменшується в 1,4–2,2 разу;

3. Установлено механізм зношування РІ зі сталі Р6М5 після точіння сталі 30ХГСА. У результаті мікроскопічних досліджень виявлено, що на поверхні тертя є прояви абразивного і втомного зношування, які полягають у втисненні абразивної частинки, дряпанні і виривів поверхневих шарів РІ та утворенні і поширенні тріщин;

4. Установлено, що при комплексному насиченні поверхневих шарів сталі Р6М5 азотом і титаном формується покриття – з шарів карбиду титану TiC та нітриду титану TiN , при насиченні азотом і хромом – з шарів карбідів $Cr_{23}C_6$, Cr_7C_3 та нітриду хрому Cr_2N з високою мікротвердістю. Показано, що зносостійкість сталі Р6М5 з багатокомпонентними покриттями (азототитанування, азотохромування) в умовах тертя ковзання без змащування та стійкість РІ зростає порівняно з азотуванням, а коефіцієнт тертя зменшується. За рахунок матеріалу покриття формуються вторинні структури, які мають оптимальні властивості та залежать від хімічного складу багатокомпонентних покриттів, що сприяє підвищенню зносостійкості;

5. Розроблено технологічний процес формування БГП на основі Ti , Hf і Si . Висока припрацьовуваність і зносостійкість БГП обумовлена тим, що співвідношення компонентів у верхньому (зовнішньому) підшарі забезпечує

правило додатнього градієнта механічних властивостей (менший зсувний опір) завдяки нижчій твердості і підвищеній пластичності порівняно з нижнім основним підшаром. Випробування в умовах тертя ковзання без змащування і в умовах не жорстко закріплених абразивних частинок показали підвищення зносостійкості в порівнянні з одношаровим покриттям TiN та сталлю Р6М5 у вихідному стані;

6. За результатами експериментальних досліджень були побудовані математичні моделі залежностей триботехнічних характеристик БГП від конструктивних, технологічних та експлуатаційних факторів проведено багатокритеріальну оптимізацію процесу формування зовнішнього підшару верхнього шару;

7. Установлено, що процес зношування РІ з іонно-плазмовим БГП на основі Ti-Hf-Si-N обумовлений механізмами зносу: від самоорганізації – при утворенні вторинних структур з реалізацією ефекту пристосовуваності – до наступного руйнування, а також у присутності пластичного деформування, втомного, абразивного та адгезійного руйнування;

8. Установлено закономірності зношування сталі Р6М5 з різними типами комбінованої обробки в умовах абразивного зносу при терті не жорстко закріпленими абразивними частками, який має місце при експлуатації РІ, показано, що стійкість РІ є вищою з покриттями, які мають вищу абразивну зносостійкість;

9. Розроблено триботехнологію комплексного підвищення експлуатаційних характеристик сталі Р6М5 при нанесенні іонно-плазмового покриття TiN, яка полягає у ДЛЮ в режимі оплавлення поверхні невідпущеного інструменту з наступним відпуском загартованого інструменту при підвищених температурах 560–580 °С і суміщенням його з операцією нанесення покриттів і дозволяє підвищити теплостійкість сталі Р6М5 на 20 °С та температуру нанесення покриттів до 580 °С. Результати випробувань іонно-плазмового покриття TiN, нанесеного за даною технологією, показали збільшення триботехнічних властивостей в порівнянні з типовою технологією.

10. Результати роботи впроваджено у навчальний процес при викладанні дисципліни «Матеріалознавство». Проведені випробування РІ зі сталі Р6М5 після ДЛЮ за сітчасто-стільниковою схемою та наступним азотуванням на ДП «Завод 410 ЦА» показали, що результати можуть бути впроваджені у виробництво. Розроблена триботехнологія нанесення іонно-плазмового покриття TiN впроваджена на ФОП «Олійник П.І.».

СПИСОК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

У іноземних та спеціалізованих виданнях

1. Korbut E. V. Procesy zuzycia wedlug schematu “narzedzie tnace – stopy tytanu”/ E. V. Korbut, E. Wajs, O. V. Radko, V. F. Labunec, W. W. Zagrebelny // *Obrobka metalu*, 2015. – № 1. – С. 36–39.

2. Pashechko M. Functional plasma-deposited coatings / M. Pashechko, M. Kindrachuk, I. Gumeniuk, O. Tisov, V. Zahrebelniy // *Advances in Science and Technology Research Journal*. – Volume 11. – Issue 4, 2017. – P. 301–304.

У фахових виданнях

3. Загребельний В. В. Підвищення експлуатаційних властивостей швидкорізальних сталей комбінованою лазеро-хіміко-термічною обробкою / В. В. Загребельний // Проблеми трибології, 2016. – № 3. – С. 59–64.

4. Кіндрачук М. В. Технологічні аспекти забезпечення працездатності інструменту з швидкорізальних сталей / М. В. Кіндрачук, В. В. Загребельний, В. Г. Хижняк, Н. А. Харченко // Проблеми тертя та зношування, 2016. – Вип. 1 (70). – С. 67–78.

5. Хижняк В. Г. Комбінований метод зміцнення сталі Р6М5 азототитануванням, азотохромованням та дискретною лазерною обробкою / В. Г. Хижняк, М. В. Кіндрачук, В. В. Загребельний // Проблеми трибології, 2015. – № 4. – С. 99–105.

6. Кіндрачук М. В. Параметри дискретної структури азотованих покриттів рівної зносостійкості та з підвищеним опором втомному руйнуванню / М. В. Кіндрачук, В. В. Клімін, І. А. Гуменюк, В. В. Загребельний, В. Є. Костюк // Проблеми тертя та зношування, 2015. – Вип. 4 (69). – С. 58–63.

7. Лабунець В. Ф. Причини та характер зношування різального інструменту при механічній обробці різанням титановмістних композиційних матеріалів / В. Ф. Лабунець, Є. В. Корбут, О. В. Радько, В. С. Шевчук, В. В. Загребельний // Проблеми тертя та зношування, 2015. – Вип. 3 (68). – С. 69–73.

8. Загребельний В. В. Дослідження триботехнічних характеристик швидкорізальної сталі Р6М5 з комбінованим покриттям / В. В. Загребельний, В. Ф. Лабунець, Я. В. Богач // Проблеми тертя та зношування, 2017. – Вип. 4 (77). – С. 80–84.

Матеріали та тези конференцій

9. Загребельний В. В. Підвищення експлуатаційних характеристик різального інструменту зі сталі Р6М5 дискретною лазерною обробкою / В. В. Загребельний // Технічна творчість: зб. наук. праць (вип. присвячено Міжнародній наук.-техн. конф. молодих науковців «Сучасні технології в механіці», 21-23 квітня 2016 р., м. Хмельницький. – Хмельницький : ХНУ, 2016. – № 1. – С. 140–142.

10. Лабунець В. Ф. Формування зносостійкого покриття на різальному інструменті зі сталі Р6М5 / В. Ф. Лабунець, В. В. Загребельний // XVII Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», 21–24 червня 2016 р, м. Одеса – м. Київ : матеріали. – С. 253–255.

11. Labunets V. F. Improve the stability of the cutting tool of steel R6M5 with wear-resistant coatings / V. F. Labunets, V. V. Zagrebelniy // Aviation in the XXI-st century : Safety in Aviation and Space Technologies, 19–21 september, 2016 Kyiv, Ukraine : proceedings the seventh world congress. – Kyiv: NAU, 2016. – P. 1.4.41–1.4.46.

12. Кіндрачук М. В. Напружено-деформований стан сталі Р6М5 після лазеро-хіміко-термічної обробки / М. В. Кіндрачук, В. Ф. Лабунець, В. В. Загребельний // Авіа-2017 : XIII Міжнародної наук.-техн. конф., 19–21 квітня 2017, Київ: матеріали. – К. : НАУ, 2017. – С. 19.56–19.60.

13. Загребельний В. В. Властивості напружено-деформованого стану сталі Р6М5 поверхнево зміцненої комбінованими методами / В. В. Загребельний // Науково-технічна конференція студентів, аспірантів, докторантів та молодих учених «Інноваційні технології», 12–13 квітня 2017, м. Київ : матеріали. – К. : НАУ, 2017. – С. 50.

14. Корбут Є. В. Триботехнічні випробування сталей із зносостійкими комбінованими покриттями / Є. В. Корбут, В. Ф. Лабунець, О. В. Радько, В. В. Загребельний // XVIII Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта 2017», 29 червня – 01 липня 2016 р. : матеріали. – К. : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – С. 241–242.

Патенти

15. Пат. 107190 Україна, МПК (2016.01) С23С 22/00. Спосіб отримання зносостійких покриттів з високою припрацьовуваністю і підвищеним опором втомному руйнуванню / Кіндрачук М. В., Загребельний В. В., Лабунець В. Ф., Нечипорук В. В., Богач Я. В., Веремійчук В. В., Пищенко Ю. В., Якимчук А. Р.; заявник та патентовласник Національний авіаційний університет. – № u 201511639; заявл. 25.11.2015; опубл. 25.05.2016, Бюл. № 10.

16. Пат. 98227 Україна, МПК (2015.01) С23С 14/00. Градієнтне покриття з високою припрацьовуваністю і зносостійкістю / Корбут Є. В., Лабунець В. Ф., Кіндрачук М. В., Радько О. В., Данілов А. П., Загребельний В. В.; заявник та патентовласник Національний авіаційний університет. – № u 201410946; заявл. 07.10.2014; опубл. 27.04.2015, Бюл. № 8.

17. Пат. 99744 Україна, МПК С23С 14/32 (2006.01). Спосіб зміцнення метало-різального інструменту з швидкорізальних сталей / Кіндрачук М. В., Корбут Є. В., Лабунець В. Ф., Радько О. В., Загребельний В. В., Гуменюк І. А.; заявник та патентовласник Національний авіаційний університет. – № u 201412996; заявл. 04.12.2014; опубл. 25.06.2015, Бюл. № 12.

АНОТАЦІЯ

Загребельний В.В. Технологічне забезпечення підвищеної зносостійкості швидкорізальної сталі Р6М5 комбінованими методами поверхневого зміцнення. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю: 05.02.04 – тертя та зношування в машинах (13 – Механічна інженерія). Національний авіаційний університет, Київ, 2018 р.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню важливого актуального завдання підвищення зносостійкості поверхневих шарів різального інструменту зі швидкорізальної сталі Р6М5 шляхом формування зносостійких покриттів комбінованими методами та встановлення закономірностей впливу структурно-фазового складу та параметрів структури дискретних і градієнтних покриттів на фізико-механічні й триботехнічні властивості.

Досліджено закономірності формування структури дискретно азотованої сталі Р6М5 залежно від схем попередньої дискретної лазерної обробки та технологічних параметрів азотування. Проведено аналітичні розрахунки напружено-деформованого стану. Встановлено закономірності й механізм зношування дискретно азотованої сталі Р6М5.

Установлено закономірності зношування багатокомпонентних азотохромованих та азототитанованих покриттів в умовах тертя ковзання без змащування в залежності від хімічного і структурно-фазового складу.

Розроблено градієнтне покриття на основі Ti, Hf, Si, встановлено його триботехнічні властивості та механізм зношування. Було проведено статистичний аналіз та побудовано регресійні моделі залежностей критеріїв оптимізації.

Розроблено триботехнологію нанесення іонно-плазмових покриттів TiN, яка дозволить підвищити теплостійкість сталі Р6М5, скоротити операції відпуску та підвищити її зносостійкість, а також досліджено триботехнічні властивості сталі Р6М5 з покриттям TiN, нанесеним за даною технологією.

Установлено, що стійкість різального інструменту зі сталі Р6М5 після різних типів комбінованої обробки є вищою з тими покриттями, які мають вищу абразивну зносостійкість при терті в умовах не жорстко закріпленими абразивними частками.

Ключові слова: різальний інструмент, зносостійкість, комбіновані методи, багат шарові покриття, дискретні покриття, градієнтні покриття

АННОТАЦИЯ

Загребельний В. В. Технологическое обеспечение повышенной износостойкости быстрорежущей стали Р6М5 комбинированными методами поверхностного упрочнения. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности: 05.02.04 – трение и изнашивание в машинах (13 – Механическая инженерия). Национальный авиационный университет, Киев, 2018 г.

Диссертационная работа посвящена решению важной актуальной задачи повышения износостойкости поверхностных слоев РИ из быстрорежущей стали Р6М5 путем формирования износостойких покрытий комбинированными методами и установления закономерностей влияния структурно-фазового состава и параметров структуры дискретных и градиентных покрытий на физико-механические и триботехнические свойства.

Исследованы закономерности формирования структуры дискретно азотированной стали Р6М5 в зависимости от схем предыдущей дискретной лазерной обработки и технологических параметров азотирования. Показано, что лазерная обработка позволяет ускорить процессы диффузии атомов азота в поверхностные слои стали Р6М5, а также уменьшить хрупкость и увеличить твердость азотированного покрытия.

Проведены аналитические расчеты напряженно-деформированного состояния для определения оптимальной площади лазерной обработки, на которой наблюдаются минимальные напряжения при трении. Установлены закономерности и механизм изнашивания дискретно азотированной стали Р6М5 в зависимости от параметров дискретной структуры покрытий островкового и сотового типа.

Триботехнические испытания упрочненной стали Р6М5, дискретная лазерная обработка по разным схемам показали, что более высокая стойкость, износостойкость в условиях трения скольжения и абразивную износостойкость режущего инструмента из стали Р6М5 обеспечивает сетчато-сотовая схема по сравнению со схемой островного типа. Это обусловлено тем, что дискретные участки с разной твердостью и толщиной способствуют лучшей приработке покрытия и минимизируют напряжение при трении.

Установлены закономерности изнашивания многокомпонентных азотохромированных и азототитанированных покрытий в условиях трения скольжения без смазки в зависимости от химического и структурно-фазового состава.

Разработано градиентное покрытие на основе Ti, Hf, Si, установлены его триботехнические свойства и механизм изнашивания. Высокая износостойкость и приработка этого покрытия достигаются соотношением компонентов в верхнем (внешнем) подслое, за счет чего обеспечивается правило положительного градиента механических свойств благодаря меньшей твердости и повышенной пластичности по сравнению с нижним основным подслоем.

Был проведен статистический анализ и построены регрессионные модели зависимостей критериев оптимизации – величины весового износа и коэффициента трения от конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов. В результате проведенной многокритериальной оптимизации с использованием полученных математических моделей (компромисс по Парето), было найдено самое оптимальное сочетание уровней конструктивных и технологических факторов, которые влияют на критерии оптимизации.

Установлено, что процесс изнашивания режущего инструмента с ионно-плазменным многослойным градиентным покрытием на основе Ti-Hf-Si обусловлен механизмами износа: от самоорганизации – при образовании вторичных структур с реализацией эффекта приспособляемости к последующему разрушению, а также в присутствии пластичного деформирования, усталостного, абразивного и адгезионного разрушения.

Разработана триботехнология нанесения ионно-плазменных покрытий TiN, которая позволит повысить теплостойкость стали Р6М5, сократить операции отпуска и повысить ее износостойкость. Она заключается в дискретной лазерной обработке в режиме оплавления поверхности неотпущенного инструмента с последующим отпуском закаленного инструмента при повышенных температурах 560–580 °С и совмещением его с операцией нанесения покрытий, что позволяет повысить теплостойкость стали Р6М5 на 20 °С и температуру нанесения покрытий до 580 °С. Результаты испытаний ионно-плазменного покрытия TiN, нанесенного по данной технологии, показали увеличение триботехнических характеристик по сравнению с типовой технологией.

Установлена связь между износостойкостью покрытий в условиях трения скольжения и в условиях абразивного изнашивания, которое свидетельствует о значительной части абразивного износа в износостойкости инструмента при эксплуатации. Испытания стали Р6М5 с разными типами комбинированной обработки в условиях абразивного износа при трении не жестко закрепленными абразивными частицами показали, что стойкость режущего инструмента становится выше с покрытиями, имеющими высшую абразивную износостойкость.

Некоторые результаты диссертационной работы прошли производственные испытания и внедрены в производство.

Ключевые слова: режущий инструмент, износостойкость, комбинированные методы, многослойные покрытия, дискретные покрытия, градиентные покрытия

SUMMARY

Zahrebelnyi V. V. Technological providing of high wear resistance of high-speed steel P6M5 by combined methods of surface hardening. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for a Candidate Degree in Engineering by specialty: 05.02.04 - The friction and wear in the machines (13 – Mechanical engineering). National Aviation University, Kiev, 2018

The thesis is considers to the solution of the important actual task of increasing the wear resistance of the surface layers of the cutting tool of high speed steel R6M5 by forming wear-resistant coatings by combined methods and establishing the patterns of the influence of the structural-phase composition and the parameters of the structure of discrete and gradient coatings on the physical, mechanical and tribotechnical properties.

The regularities of formation of the structure of steel R6M5 with nitriding coatings after discrete laser treatment depending on the schemes of the previous discrete laser processing and technological parameters of nitriding are investigated. The analytical calculations of the stressed state are carried out. The regularities and mechanism of wear of discretely nitrated steel R6M5 are established.

The regularities of wear of multicomponent coated ($n+Ti$ and $n+Cr$ diffusion coatings) in the conditions of sliding friction without lubrication depending on the chemical and structural-phase composition have been established.

A gradient coating on the basis of Ti, Hf, Si was developed, its tribotechnical properties and deterioration mechanism were established. A statistical analysis was carried out and regression models of dependencies of optimization criteria were constructed.

The tribotechnology of ion-plasma coating TiN has been developed, what is will increase the heat resistance of steel P6M5, to reduce of the number high-temperature tempering and increase its wear resistance, and also investigated the tribotechnical properties of steel R6M5 with TiN coated applied by this technology.

Stability the of cutting tools of steel R6M5 after different types of combining coatings treatment is higher with those coatings that have a higher abrasive wear resistance under abrasion wear conditions when friction is not rigidly fixed abrasive particles.

Key words: cutting tool, wear resistance, combined coatings, multilayer coatings, discrete gradient coatings.

Підп. до друку 23.01.2018. Формат 60x84/16. Папір офс.
Офс. друк. Ум. друк. арк. 1,16. Обл.-вид. арк. 1,25.
Тираж 100 пр. Замовлення № 7-1.

Видавець і виготівник
Національний авіаційний університет
03680. Київ – 58, проспект Космонавта Комарова, 1

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 977 від 05.07.2002