НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Загребельний Володимир Вікторович

УДК 621.891

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

05.02.04 – тертя та зношування в машинах
Галузь знань 13 – механічна інженерія

подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

В.В. Загребельний

Науковий керівник: Лабунець Василь Федорович, кандидат технічних наук,
доцент

Київ – 2018

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.

В дисертаційній роботі вирішувалось науково-технічне завдання підвищення зносостійкості поверхневих шарів різального інструменту 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. Рішення поставленого завдання сприяє впровадженню перспективних технологічних процесів модифікації поверхневих шарів різального інструменту у виробництво і дозволяє значно підвищити його триботехнічні властивості та зменшити витрати.

Теоретичні дослідження проводилось на підставі фундаментальних положень трибології, теорії руйнування твердих тіл, структурно-енергетичної пристосованості матеріалів. Лабораторні випробування проводились в умовах тертя ковзання та не жорстко закріплених абразивних часток, а також визначали стійкість різального інструменту в умовах точіння. Методи багатофакторного планування експерименту та математичної статистики – для обробки результатів досліджень та виконання оптимізації технологічного процесу нанесення іонно-плазмового градієнтного покриття за триботехнічними критеріями.

Внаслідок отриманих результатів при проведенні наукових та експериментальних досліджень зроблені такі висновки.

Вперше розроблені технологічні процеси зміцнення поверхневих шарів сталі Р6М5 попередньою дискретною лазерною обробкою і наступним азотуванням і досліджені особливості їх структуроутворення. Показано, що лазерна обробка дозволяє прискорити процеси дифузії атомів азоту в

поверхневі шари сталі Р6М5, а також зменшити крихкість та збільшити твердість азотованого покриття.

Встановлено, що вищу зносостійкість забезпечує сітчасто – стільникова схема в порівнянні з 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 разів, коефіцієнт тертя зменшується в 1,4 - 2,2 рази.

Встановлено механізм зношування РІ зі сталі Р6М5 після точіння сталі 30ХГСА. Виявлено, що на поверхні тертя є прояви абразивного і втомного зношування, які полягають у втисненні абразивної частинки, дряпання і виривів поверхневих шарів різального інструменту та утворення і поширення тріщин.

Встановлено, що при комплексному насиченні поверхневих шарів сталі Р6М5 азотом і титаном та азотом і хромом формуються багатокомпонентні покриття. Показано, що зносостійкість сталі Р6М5 з багатокомпонентними покриттями зростає порівняно з азотуванням, а коефіцієнт тертя зменшується. За рахунок матеріалу покриття формуються вторинні структури, які мають оптимальні властивості, що сприяє підвищенню зносостійкості.

Розроблено технологічний процес формування багатошарового градієнтного покриття на основі Ti, Hf і Si. Проведено багатокритеріальну оптимізацію процесу формування зовнішнього підшару верхнього шару. Встановлено механізм зношування градієнтного покриття. Випробування в умовах тертя ковзання без змащування та стійкості в умовах точіння показали підвищення зносостійкості інструменту з даним покриттям.

За результатами експериментальних досліджень були побудовані математичні моделі залежностей триботехнічних характеристик багатошарового градієнтного покриття від конструктивних, технологічних та експлуатаційних факторів.

Встановлено 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.

Розроблено триботехнологію комплексного підвищення експлуатаційних характеристик сталі Р6М5 при нанесенні іонно-плазмового покриття TiN, яка полягає у дискретній лазерній обробці в режимі оплавлення поверхні невідпущеного РІ з наступним відпуском загартованого інструменту при підвищених температурах 560 – 580 °С і суміщенням його з нанесенням покриттів. Результати випробувань іонно-плазмового покриття TiN нанесеного за даною технологією показали збільшення триботехнічних характеристик в порівнянні з типовою технологією.

Наукова новизна роботи полягає в наступних основних положеннях:

1. Встановлено закономірності формування структури дискретно азотованої сталі Р6М5, які на відміну від існуючих враховують схеми попередньої лазерної обробки та технологічні параметри азотування. Встановлено, що оптимальною площею обробки є 60-75 %, що узгоджується з аналітичними розрахунками напружено-деформованого стану.

2. Запропоновано механізм підвищення зносостійкості і стійкості різального інструменту зі сталі Р6М5 за рахунок дискретної лазерної обробки за сітчасто-стільниковою схемою з наступним азотуванням, згідно якого 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. Вперше 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 змащування та

абразивної зносостійкості сталі після азототитанування та азотохромування, при цьому додаткова лазерна обробка підвищує твердість сталі, яка є підкладкою під покриттям і забезпечує сприятливий напружено-деформований стан в системі основа-покриття при терті.

4. Розроблено багатошарове градієнтне покриття на основі Ti, Hf, Si та встановлено механізм його зношування. Висока зносостійкість якого 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 зносостійкістю різального інструменту при експлуатації, комбіновані покриття з більшою абразивною зносостійкістю забезпечують вищу зносостійкість різального інструменту. Запропоновано визначати конструктивні параметри покриттів на різальному інструменті зі сталі Р6М5 дискретного і градієнтних типів на основі експериментальних досліджень в умовах тертя ковзання і абразивного зношування та результатів розрахунків напружено-деформованого стану, що виникає при терті робочої поверхні різального інструменту.

Практичне значення одержаних результатів. Комбіноване покриття, яке включає лазерну обробку за сітчасто – стільниковою схемою з наступним азотуванням дозволило підвищити стійкість РІ зі сталі Р6М5 в 1,7-2,2.

Розроблено та захищено деклараційними патентами України: спосіб отримання зносостійких покриттів з високою припрацьовуваністю і підвищеним опором втомному руйнуванню та градієнтне покриття з високою припрацьовуваністю і зносостійкістю.

Розроблена триботехнологія комплексного підвищення експлуатаційних

характеристик сталі Р6М5 при нанесенні іонно-плазмового покриття TiN, яка дозволяє підвищити теплостійкість сталі Р6М5 на 20 °С та температуру нанесення покриттів до 580 ˚С, що є оптимальною для нанесення зносостійких покриттів високої якості. Запропонований спосіб нанесення іонно-плазмового покриття TiN використано для зміцнення інструменту при точінні легованої термообробленої сталі ХВГ і дозволить скоротити витрати інструменту при обробці важкооброблюваних легованих сталей та отримати річний економічний ефект в сумі 45 000 гривень в рік.

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

Основні результати дисертаційних досліджень опубліковані в 17 наукових працях:

За кордоном

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, азотохромуванням 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 швидкорі-зальної 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, 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 комбі-нованими 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) C23C 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) C23C 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 C23C 14/32 (2006.01). Спосіб зміцнення металорізального 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.

SUMMARY

Zahrebelyi 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 manuscripts.

The thesis for the degree of a candidate of technical sciences in specialty 05.02.04 "Friction and wear in the machines" (13 - Mechanical engineering). - National Aviation University, Kyiv, 2018.

In the thesis was solving the scientific and technical task of increasing the wear resistance of surface layers of cutting tool from high-speed steel P6M5 was solved by applying combined discrete and gradient coatings and establishing patterns of influence of their structural-phase composition, physical-mechanical properties and structural parameters on tribotechnical characteristics. The decision of the given task facilitates introduction of perspective technological processes of modification of surface layers of cutting tools into production and allows to significantly increase its tribotechnical properties and reduce costs.

Execution of theoretical studies was carried out on the basis of the fundamental provisions of tribology, the theory of the destruction of solids, the concept of self-organization and wear-resistance of tribosystems, structural and energy adaptability of materials. Laboratory tests were carried out under conditions of slip friction and not rigidly fixed abrasive particles, and also determined the stability of the cutting tool in finishing. Methods of multifactorial planning of experiment and mathematical statistics - for processing of results of researches and performance of optimization of the technological process of applying ion-plasma multilayer gradient coatings according to tribotechnical criteria.

On the basis of the obtained scientific and practical results, the following conclusions were made.

For the first time technological processes of strengthening of surface layers of steel P6M5 by preliminary discrete laser treatment and subsequent nitriding have been developed and features of their structure formation have been investigated. It is shown that laser processing allows accelerating the processes of diffusion of nitrogen

atoms in the surface layers of steel P6M5, as well as reducing the fragility and increasing the hardness of the nitrogen coating.

It has been established that higher wear resistance provides cellular circuitry compared with the island type scheme. This is due to the fact that discrete areas with different hardness and thickness contribute to better wearing of the coating and minimize stress when rubbed. Wear resistance increases 1.5-1.7 times, the coefficient of friction decreases in 1.4-2.2 times.

The mechanism of wear of a cutting tool made of steel R6M5 after finishing the steel 30ХГСА was established. It was found that on the surface of friction there are manifestations of abrasive and fatigue wear, which consist in penetration the abrasive particles, scratching and pulling out the surface layers of the cutting tool and the formation and spread of cracks.

It was established that in the complex saturation of surface layers of steel P6M5 by deposition of n+ti and n+cr diffusion coatings formed multicomponent coatings. It is shown that wear resistance of P6M5 steel with multi-component coatings increases compared to nitriding, and the coefficient of friction decreases. Due to the coating material, secondary structures are formed that have optimal properties, which contributes to increased wear resistance.

The technological process of formation of a multilayered gradient coating on the basis of Ti, Hf and Si is developed. The multicriteria optimization of the formation of the outer sublayer of the upper layer has been carried out. The mechanism of wear of the gradient coating is established. Tests in conditions of slip friction without lubrication and stability in finishing have shown increased wear resistance of the tool with this coating.

According to the results of experimental research, mathematical models of dependencies of tribotechnical characteristics of multilayer gradient coating from constructive, technological and operational factors were constructed.

The regularities of deterioration of steel P6M5 with different types of combined treatment in the conditions of abrasive wear with friction not rigidly fixed abrasive particles, which occurs during the operation of cutting tools, has been shown

that the stability of the cutting tool is higher with coatings that have a higher abrasive wear resistance.

The tribotechnology of complex increase of operational characteristics of steel P6M5 at application of ion-plasma coating TiN, which consists in the discrete laser treatment in the mode of melting of the surface of an unopened cutting tool which consists in the discrete laser treatment in the mode of melting of the surface of cutting tool without temperin and following temperin afterwards hardening of the cutting tool at elevated temperatures of 560-580 ° C and its combining with the application of coatings, has been developed. The results of tests of ion-plasma coating of TiN deposited on this technology showed an increase in tribo-technical characteristics compared with the typical technology.

The scientific novelty of the work consists in the following basic provisions:

1. The regularities of formation of the structure of discretely nitrated steel P6M5, which, in contrast to the existing ones, take into account schemes of preliminary laser treatment and technological parameters of nitriding, are established. It was established that the optimum processing area is 60-75%, which is consistent with the analytical calculations of the stress-strain state.

2. The mechanism of increasing the wear resistance and tool life of the cutting tool made of steel P6M5 by discrete laser treatment according to the cellular circuitry followed by nitriding, according to which the composite coating performs two functions: a thin, plastic, nitrided layer on a previously unscreened surface of the laser shields the direct contact materials of tripartite and provides the process of working with the formation of specific secondary structures with high resistance to the temperature - force influences friction process. Highly hardened, discretely nitrogenated areas provide minimal stresses in friction and increased wear resistance..

3. It was found for the first time that steel P6M5 after N+Ti diffusion coatings a coating is formed from layers of TiC titanium carbide and TiN nitride, and N+Cr diffusion coatings of Cr23C6, Cr7S3 and chromium nitride Cr2N. It is shown increase of wear resistance in the conditions of sliding friction without lubrication and abrasive wear resistance of steel after N+Ti AND N+Cr diffusion coatings, while

the additional laser treatment increases the hardness of the steel, which is a substrate under the coating and provides a favorable strain state in the system of base-coating at friction.

4. A multilayered gradient coating on the basis of Ti, Hf, Si was developed and the mechanism of its wear was established. The high wear resistance of which, unlike existing ones, is achieved by the ratio of components in the upper (external) sublayer, due to which the rule of a positive gradient of mechanical properties is provided due to lower hardness and increased ductility compared with the lower main substrate. The outer layer forms secondary structures with high resistance to the temperature - force influences of the contact friction process and creates optimal conditions for the work of the main coating material.

5. The connection between the wear resistance of the combined coatings in the conditions of abrasive wear with not hardened particles and wear resistance of the cutting tool during operation, the combined coatings with a greater abrasive durability provide higher wear resistance of the cutting tool. It is proposed to determine the structural parameters of coatings on a cutting tool made of steel of R6M5 of discrete and gradient types on the basis of experimental research in conditions of friction of sliding and abrasive wear and results of calculations of stressed-deformed state that arises when friction of working surface of a cutting tool.

The practical value of the results. Combined coating, which includes laser treatment for the mesh-cellular scheme with subsequent nitriding, allowed to increase the stability of cutting tools from steel P6M5 in 1,7-2,2.

Developed and protected by the declarative patents of Ukraine: a method of obtaining wear-resistant coatings with high workability and increased resistance to fatigue fracture and gradient coating with high workability and wear resistance.

The tribotechnology of complex increase of operational characteristics of steel P6M5 at application of ion-plasma coating TiN, which allows to increase heat resistance of steel P6M5 at 20 ° C and the temperature of application of coatings to 580 ˚C, which is optimal for application of wear-resistant coatings of high quality. The proposed method of applying ion-plasma coating TiN is used to strengthen the

tool for mechanical processing the doped heat-treated steel of the HVC and will allow to reduce the cost of the tool in the processing of hard-working alloy steels and get an annual economic effect of 45 000 hryvnyas per year.

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

The main results of the dissertation research are published in 17 scientific works:

Abroad

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. – C. 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.

In professional editions

3. Zahrebelnyi V. V. Pidvyshchennia ekspluatatsiinykh vlastyvostei shvydkorizalnykh stalei kombinovanoiu lazero-khimiko-termichnoiu obrobkoiu / V. V. Zahrebelnyi // Problemy trybolohii, 2016. – № 3. – S. 59–64.

4. Kindrachuk M. V. Tekhnolohichni aspekty zabezpechennia pratsezdatnosti instrumentu z shvydkorizalnykh stalei / M. V. Kindrachuk, V. V. Zahrebelnyi, V. H. Khyzhniak, N. A. Kharchenko // Problemy tertia ta znoshuvannia, 2016. – Vyp. 1 (70). – S. 67–78.

5. Khyzhniak V. H. Kombinovanyi metod zmitsnennia stali R6M5 azototytanuvanniam, azotokhromuvanniam ta dyskretnoiu lazernoiu obrobkoiu / V. H. Khyzhniak, M. V. Kindrachuk, V. V. Zahrebelnyi // Problemy trybolohii, 2015. – № 4. – S. 99–105.

6. Kindrachuk M. V. Parametry dyskretnoi struktury azotovanykh pokryttiv rivnoi znosostiikosti ta z pidvyshchenym oporom vtomnomu ruinuvanniu / M. V. Kindrachuk, V. V. Klimin, I. A. Humeniuk, V. V. Zahrebelnyi, V. Ye. Kostiuk // Problemy tertia ta znoshuvannia, 2015. – Vyp. 4 (69). – S. 58–63.

7. Labunets V. F. Prychyny ta kharakter znoshuvannia rizalnoho instrumentu pry mekhanichnii obrobtsi rizanniam tytanovmistnykh kompozytsiinykh materialiv / V. F. Labunets, Ye. V. Korbut, O. V. Radko, V. S. Shevchuk, V. V. Zahrebelnyi // Problemy tertia ta znoshuvannia, 2015. – Vyp. 3 (68). – S. 69–73.

8. Zahrebelnyi V. V. Doslidzhennia trybotekhnichnykh kharakterystyk shvydkori-zalnoi stali R6M5 z kombinovanym pokryttiam / V. V. Zahrebelnyi, V. F. Labunets, Ya. V. Bohach // Problemy tertia ta znoshuvannia, 2017. – Vyp. 4 (77). – S. 80–84.

Materials and conference theses

9. Zahrebelnyi V. V. Pidvyshchennia ekspluatatsiinykh kharakterystyk rizalnoho instrumentu zi stali R6M5 dyskretnoiu lazernoiu obrobkoiu / V. V. Zahrebelnyi // Tekhnichna tvorchist: zb. nauk. prats, 21-23 kvitnia 2016 r., m. Khmelnytskyi. – Khmelnytskyi : KhNU, 2016. – № 1. – S. 140–142.

10. Labunets V. F. Formuvannia znosostiikoho pokryttia na rizalnomu instrumenti zi stali R6M5 / V. F. Labunets, V. V. Zahrebelnyi // XVII Mizhnarodna naukovo-tekhnichna konferentsiia «Prohresyvna tekhnika, tekhnolohiia ta inzhenerna osvita», 21–24 chervnia 2016 r, m. Odesa – m. Kyiv : materialy. – S. 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. Kindrachuk M. V. Napruzheno-deformovanyi stan stali R6M5 pislia lazero-khimiko-termichnoi obrobky / M. V. Kindrachuk, V. F. Labunets, V. V. Zahrebelnyi // Avia-2017 : KhIII Mizhnarodnoi nauk.-tekhn. konf., 19–21 kvitnia 2017, Kyiv: materialy. – K. : NAU, 2017. – S. 19.56–19.60.

13. Zahrebelnyi V. V. Vlastyvosti napruzheno-deformovanoho stanu stali R6M5 poverkhnevo zmitsnenoi kombinovanymy metodamy / V. V. Zahrebelnyi // Naukovo-tekhnichna konferentsiia studentiv, aspirantiv, doktorantiv ta molodykh uchenykh «Innovatsiini tekhnolohii», 12–13 kvitnia 2017, m. Kyiv : materialy. – K. : NAU, 2017. – S. 50.

14. Korbut Ye. V. Trybotekhnichni vyprobuvannia stalei iz znosostiikymy kombi-novanymy pokryttiamy / Ye. V. Korbut, V. F. Labunets, O. V. Radko, V. V. Zahrebelnyi // XVIII Mizhnarodna naukovo-tekhnichna konferentsiia «Prohresyvna tekhnika, tekhnolohiia ta inzhenerna osvita 2017», 29 chervnia – 01 lypnia 2016 r. : materialy. – K. : KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2017. – S. 241–242.

Patents

15. Pat. 107190 Ukraina, MPK (2016.01) C23C 22/00. Sposib otrymannia znosostiikykh pokryttiv z vysokoiu prypratsovuvanistiu i pidvyshchenym oporom vtomnomu ruinuvanniu / Kindrachuk M. V., Zahrebelnyi V. V., Labunets V. F., Nechyporuk V. V., Bohach Ya. V., Veremiichuk V. V., Pyshchenko Yu. V., Yakymchuk A. R.; zaiavnyk ta patentovlasnyk Natsionalnyi aviatsiinyi universytet. – № u 201511639; zaiavl. 25.11.2015; opubl. 25.05.2016, Biul. № 10.

16. Pat. 98227 Ukraina, MPK (2015.01) C23C 14/00. Hradiientne pokryttia z vysokoiu prypratsovuvanistiu i znosostiikistiu / Korbut Ye. V., Labunets V. F., Kindrachuk M. V., Radko O. V., Danilov A. P., Zahrebelnyi V. V.; zaiavnyk ta patentovlasnyk Natsionalnyi aviatsiinyi universytet. – № u 201410946; zaiavl. 07.10.2014; opubl. 27.04.2015, Biul. № 8.

17. Pat. 99744 Ukraina, MPK C23C 14/32 (2006.01). Sposib zmitsnennia metalo-rizalnoho instrumentu z shvydkorizalnykh stalei / Kindrachuk M. V., Korbut Ye. V., Labunets V. F., Radko O. V., Zahrebelnyi V. V., Humeniuk I. A.; zaiavnyk ta patentovlasnyk Natsionalnyi aviatsiinyi universytet. – № u 201412996; zaiavl. 04.12.2014; opubl. 25.06.2015, Biul. № 12.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ…….…….…….. 19
ВСТУП……..…….…….. 20
РОЗДІЛ 1. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ…….. 28
1.1 Матеріали, які використовуться для виготовлення різального інструменту…..……... 29
1.2 Основні причини та характер руйнування робочих поверхонь різального інструменту…….…… 30
1.3 Аналіз сучасних технологічних методів поверхневого зміцнення різального інструменту із швидкорізальної сталі……... 33
1.4 Вибір методів нанесення покриттів для комбінованої обробки різального інструменту із швидкорізальної сталі Р6М5……... 44
1.5 Висновки до розділу та постановка наукового завдання дослідження…… 54
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ……..……. 57
2.1 Методика здійснення азотування та дифузійної металізації..... 57
2.2 Лазерна обробка зразків……...…..…… 58
2.3 Методика і установка для нанесення покриттів іонно-плазмовим методом …….. 59
2.4 Мікроструктурний аналіз …….……..…….. 60
2.5 Мікрорентгеноструктурний та рентгеноспектральний аналізи…… 60
2.6 Дюрометричний аналіз покриттів…… 60
2.7 Розрахунки напружено-деформованого стану сталі Р6М5 після комбінованої обробки ……..……..... 61
2.8 Визначення триботехнічних властивостей сталі Р6М5 після комбінованої обробки……..…….. 65
2.9 Визначення стійкості інструменту після комбінованої обробки…….. 66

2.10 Математичне моделювання формування зносостійких іонно-плазмових градієнтних покриттів……. 67
2.11 Висновки до розділу……..……..... 73
РОЗДІЛ 3 ФОРМУВАННЯ ЗНОСОСТІЙКИХ ДИСКРЕТНИХ ПОКРИТТІВ НА СТАЛІ Р6М5 ШЛЯХОМ АЗОТУВАННЯ ТА ЛАЗЕРНОЇ ОБРОБКИ ……...……..... 74
3.1 Азотування швидкорізальної сталі Р6М5…….…….. 75
3.2 Комбінована лазеро-хіміко-термічна обробка сталі Р6М5…….…….. 76
3.3 Вплив дискретної лазерної обробки і наступного азотування на напружено-деформований стан сталі Р6М5 при терті …….……. 80
3.4 Формування властивостей дискретно азотованих покриттів на сталі Р6М5 ……...…… 82
3.5. Дослідження триботехнічних властивостей сталі Р6М5 після після лазерної обробки та наступного азотування ……..……..... 83
3.6 Висновки до розділу…….. 96
РОЗДІЛ 4 ЗМІЦНЕННЯ СТАЛІ Р6М5 БАГАТОКОМПОНЕНТНИМИ ПОКРИТТЯМИ НА ОСНОВІ АЗОТУ ТА ТИТАНУ, АЗОТУ ТА ХРОМУ.. 98
4.1 Фазовий склад, фізико-механічні та триботехнічні властивості сталі Р6М5 після азототитанування, азотохромування та дискретної лазерної обробки ……..……. 99
4.2 Дослідження триботехнічних властивостей та встановлення закономірностей зношування сталі Р6М5 з багатокомпонентними покриттями…….. 100
4.3 Висновки до розділу…….……. 109
РОЗДІЛ 5 ПІДВИЩЕННЯ ТРИБОТЕХНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СТАЛІ Р6М5 ІОННО-ПЛАЗМОВИМ МЕТОДОМ НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТІВ…….…….. 111
5.1 Математичне моделювання формування зносостійких іонно-плазмових градієнтних покриттів на основі Ti, Hf та Si…… 112

5.2 Технологічний процес формування градієнтного покриття…….. 118
5.3 Триботехнічні властивості сформованого градієнтного покриття…… 120
5.4 Побудова математичних моделей за результатами експериментальних досліджень…… 124
5.5 Визначення оптимальних параметрів удосконаленого технологічного процесу нанесення іонно-плазмових багатошарових градієнтних покриттів..... 134
5.6 Механізм зносу сформованого багатошарового градієнтного покриття різального інструменту…… 137
5.7 Розробка триботехнології комплексного підвищення експлуатаційних характеристик сталі Р6М5 при нанесенні іонно-плазмового покриття TiN…… 146
5.8 Триботехнічні властивості покриття TiN нанесеного за запропонованою технологією…… 148
5.9 Висновки до розділу…… 154
ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ…… 157
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ…… 160
ДОДАТКИ…… 180

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

РІ – різальний інструмент

ДЛО – дискретна лазерна обробка

ХТО – хіміко-термічна обробка

НДС – напружено-деформований стан

БГП – багатошарові покриття

ЛО – лазерна обробка

МО – механічна обробка

ІМ – інструментальні матеріали

КМ – комбіновані методи

ДМ – дифузійна металізація

ЕІЛ – електроіскрове легування

ДП – дискретні покриття

ВСТУП

Для вирішення важливого державного завдання, яке полягає у підвищенні продуктивності металообробної промисловості до верстато-інструментальної галузі ставляться вимоги з розробки і впровадження нового високоефективного устаткування, інструментальних матеріалів і прогресивних технологій, а також різального інструменту (РІ). Від стійкості різального інструменту залежить його довговічність та техніко-економічні показники механічної обробки (МО). Тому при розробці нових типів інструментів особлива увага приділяється питанням підвищення їх зносостійкості і працездатність, які закладаються на всіх етапах створення, починаючи з конструювання і закінчуючи технологічним його виготовленням і зміцненням. Вказані напрямки тісно пов´язані між собою, тому комплексне забезпечення створення необхідного хімічного складу і структури інструментальних матеріалів, технології термічного зміцнення та нанесення зносостійких покриттів може значно підвищити економічну ефективність використання РІ, особливо в автоматизованих лініях і гнучких виробничих системах [1, 2].

Собівартість виготовленої продукції та її конкурентоздатність залежить від технологічності операції різання, якості отриманої поверхні, швидкості процесу МО, витрат змащувально-охолоджуючої рідин та ресурсу РІ. При цьому важливим завданням є виявлення природи зносу, вивчити явища, які розвиваються в зоні контакту «РІ-оброблюваний матеріал», а також причини та характер руйнування поверхневих шарів інструменту. Все це дозволить розробити конкретні вимоги до матеріалів РІ, матеріалів покриттів та методів їх нанесення [1, 2].

На теперішній час спостерігається вагомий прогрес в створенні технологій нанесення зносостійких покриттів проте, існують деякі проблеми, рішення яких можливе тільки на основі глибокого вивчення процесів та їх закономірностей, що розвиваються в контактній зоні «РІ-оброблюваний матеріал».

При МО РІ, зазвичай піддаються одночасній дії зношування їх різальних крайок і впливу зовнішнього навантаження, що призводить до втрати працездатності. Тому добре обгрунтований вибір інструментальних матеріалів (ІМ), виду та режимів термічної обробки, технологічних умов нанесення зносостійких покриттів на поверхневі шари різальних крайок інструментів можливий за рахунок комплексного вивчення закономірностей і механізму їх зношування в умовах контактної взаємодії та встановлення причин руйнування.

Актуальність теми. Для вирішення завдання підвищення працездатності і надійності 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 ренгеноспектральним методами. Механічні властивості поверхневих шарів визначали дюрометричними 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 змащування та абразивної зносостійкості сталі після азототитанування та азотохромування, при цьому додаткова ДЛО 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 ДЛО за сітчасто-стільниковою 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 °С та температуру нанесення покриттів до 580 ˚С, 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 багатокомпонентними 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 «HightMatTech» (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.

РОЗДІЛ 1
ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД ТА ПОСТАНОВКА ЗАВДАНЬ ДОСЛІДЖЕННЯ

В різних галузях промисловості, зокрема в машинобудівній та авіаційній спостерігається тенденція до постійного збільшення експлуатаційних характеристик (міцність, твердість, зносостійкість і тд.) конструкційних матеріалів. Це досягається за рахунок створення нових конструкційних матеріалів, що в свою чергу призводить до ускладнення їх обробки різанням [1].

МО металів і сплавів РІ (свердлення, фрезерування, точіння та ін.) на автоматизованих лінія або верстатах займає одне з основних місць в технологічному процесі виготовлення виробів. Фізична суть обробки металів та сплавів різанням полягає у видаленні шару металу у вигляді стружки з метою отримання деталі необхідної форми, розмірів та якості поверхні [3, 4]

Під час МО виникають проблеми, які пов'язані із забезпеченням якості і точності обробленої поверхні. Якість поверхні готових виробів машинобудівної, авіаційної та ракетно-космічної техніці, відіграє дуже важливу роль у забезпеченні високих та надійних експлуатаційних показників [5]. Наявність цих дефектів значно впливає на надійність виробу.

Одним з факторів, який має найбільший вплив на якість виробу і виникнення дефектів є зношування РІ [6]. Для того, щоб збільшити зносостійкість РІ, тим самим покращити процес МО та одержати потрібну якість поверхні оброблюваного матеріалу можуть бути запропоновані такі заходи як зміна геометрії інструменту, комплекс дій направлений на регулювання подачі, наявності підкладки під виробом у процесі обробки, а також технологічні методи, такі як нанесення покриттів на різальні крайки РІ [2, 7]. При використанні зносостійких покриттів можливо керувати властивостями ІМ, зношуванням і працездатністю РІ за рахунок вибору складу, структури, будови покриття і технологічних умов його отримання [7].

1.1. Матеріали, які використовуться для виготовлення різального інструменту.

Обробка різанням є складним і дорогим процесом, який характеризується значною працеємністю і значними витратами металу [8]. Існує велика кількість РІ, які відрізняється розмірами, продуктивністю, ступенем автоматизації, що забезпечує виконання обробки різанням різними способами на усіх типах виробництва [9, 10, 11].

ІМ повинні володіти високою зносостійкістю, твердістю, міцністю, теплостійкістю, теплопровідністю, теплоємністю, а також мати сприятливі фрикційні та адгезійні властивості і хорошу технологічність [11].

Для виготовлення РІ використовують широку номенклатуру ІМ: леговані і швидкорізальні інструментальні сталі; тверді сплави; різальна кераміка; надтверді матеріали [11, 12, 13].

Найбільш поширеним ІМ для виготовлення РІ є швидкорізальна сталь, яка поєднує комплекс експлуатаційних властивостей таких як високу міцність, зносостійкість, твердість, теплостійкість (~ 600ºС), а також має підвищений опір до пластичної деформації [11]. РІ виготовлений з швидкорізальної сталі характеризується високою червоностійкістю – період, протягом якого РІ витримує високу температуру при МО без втрати своїх експлуатаційних властивостей [11].

Сталь марки Р6М5 є найпоширенішою з усіх груп швидкорізальних сталей, обсяг її виробництва становить 80 % від загального виробництва швидкорізальних сталей [11]. Перевагою сталі Р6М5 в тому, що з неї можливо виготовляти майже будь-які типи РІ (свердла, різці, фрези та ін.), які використовується для обробки сталей, кольорових металів і сплавів, чавунів, дерева, композиційних та інших матеріалів [11].

Швидкорізальні сталі представляють собою високолеговані сталі з високим вмістом вольфраму, хрому, молібдену, кобальту, ванадію. Легуючі елементи визначають властивості швидкорізальної сталі за рахунок утворення

карбідів, а вуглець є джерелом утворення карбідів. Підвищення твердості, теплостійкості і зносостійкості забезпечують карбіди вольфраму, але при цьому знижуються міцність, та збільшується ціна сталі. Тому, для заміни вольфраму вводиться молібден, який, в свою чергу, знижує карбідну неоднорідність, підвищує в'язкість, міцність, схильність до окислення і чутливість до зневуглецювання. Хром впливає на підвищення загартовуваності, покращує оброблюваність різанням сталі перед гартуванням. Ванадій підвищує зносостійкість, твердість, теплостійкість, знижує в'язкість, шліфуємість. Необхідність більшого вмісту ванадію і кобальту збільшує ціну сталей тому, з урахуванням цих умов, більш розповсюдженою є сталь марки Р6М5 [11].

1.2. Основні причини та характер руйнування робочих поверхонь різального інструменту.

Під час МО внаслідок дії високих навантажень і температури, а також швидкості відносного переміщення, контактні поверхні РІ та оброблювальної деталі знаходяться у важких умовах тертя та ковзання [14, 15]. При цьому відбувається зміна процесу різання – змінюються геометричні параметри різальної частини РІ (руйнуються різальні крайки), через що він втрачає свої різальні властивості, тобто відбувається його зношування [16].

Визначення різальних властивостей інструменту характеризується складним комплексом чинників, які впливають на його важливі експлуатаційні властивості (теплостійкість, теплопровідність, мікротвердість, міцність, ударну в’язкість, стійкість проти окислювання при підвищених температурах), та визначають контактні характеристики, термомеханічний напружений стан і працездатність інструменту [6, 11, 12, 16].

Перераховані властивості ІМ в основному є взаємовиключними, тому створення ІМ, який володіє високим поєднанням комплексу вищезазначених властивостей в об’ємі однорідного тіла, практично неможливо [7, 12].

У процесі різання, в залежності від швидкості, питомого тиску і

характеру контакту інструменту з оброблюваним матеріалом, на робочих крайках інструменту одночасно протікає цілий ряд фізичних та хімічних процесів, сукупність дій цих процесів призводить до зношування РІ [11, 17].

З аналізу праць [18-20] можливо сформулювати основні фізико-хімічні процеси, які протікають на поверхнях різальних крайок інструменту та викликають його руйнування: підвищення температури різальної крайки внаслідок тертя; зростання сили та коефіцієнту тертя; виникнення змінних та знакозмінних напружень; виникнення пластичної деформації; протікання дифузійних процесів; процеси окиснення; втомне та абразивне руйнування; хімічна взаємодія матеріалу РІ з оброблюваим виробом.

В процесі МО, в результаті зношування різальних крайок інструмент втрачає свою працездатність. Працездатність РІ – стан, при якому він виконує процес різання із заданими технічними вимогами [11]. Зносостійкість – властивість матеріалу чинити опір зношуванню за визначених умов тертя [11]. Стійкість РІ – це період безперервного різання до досягнення певної величини зносу [11]. Затуплення РІ – стан, коли РІ не може здійснювати різання [21]. Затуплений РІ може зберігати свої різальні властивості, але якість отриманого виробу не буде задовольняти вимогам [21].

При недостатній міцності різальних крайок інструменту його руйнування відбувається внаслідок викришування, сколювання, виникнення і розвитку тріщин або внаслідок пластичної деформації [22, 23].

Крихке руйнування різальних крайок РІ є результатом поступового розвитку й нагромадження мікротріщин, які зі збільшенням зовнішнього навантаження зливаються в макротріщину [22]. Існує два види крихкого руйнування – викришування різальних кромок і сколи [22]. Внаслідок викришування відбувається відділення дрібних частинок різальної крайки через мікротріщини, сколи і т.д. Сколи – відділення великих об'ємів матеріалу різальної крайки РІ, взалежності від властивостей інструментального та оброблюємого матеріалу [22]. Руйнування різальних крайок може відбуватись і за рахунок утворення наросту, який є результатом зварювання матеріалу

оброблюваної деталі з матеріалом різальної частини інструменту [22].

При пластичній деформації різальної крайки РІ має місце пластичний характер руйнування поверхневих шарів та їх наступний зріз уздовж задньої або передньої поверхні інструменту: внаслідок інтенсивного нагріву поверхневих шарів РІ виникає підвищеня пластичності ІМ, що призводить до розвитку пластичної деформації [24].

При наявності великих навантажень на різальних крайках РІ виходить з ладу через мікровикришування та об'ємне руйнування – за рахунок зниження втомної міцності, також виникають втомні тріщини [25].

РІ втрачає свою працездатність також внаслідок досягнення граничного зносу різальних крайок [24]. Катастрофічне зношення (вихід з ладу) РІ зумовлене його зносом одночасно по задній і по передній поверхнях та об’ємним пружно-пластичним процесом деформування [22].

Як зазначалось вище, під час МО на різальних крайках інструменту виникають високі температура і тиск. В результаті цього, а також взалежності від режимів різання відбуваються такі види зносу: абразивний, адгезійний, дифузійний, окисний, втомний [26-28]. Взалежності від умов МО, виду РІ його геометричних параметрів різальної частини і властивостей оброблюваного матеріалу можуть спостерігатися всі види зносу, але перважаючим буде тільки один з них [27].

Абразивний знос може виникати через те, що оброблюваний матеріал містить тверді включення, які при взаємодії з поверхнею РІ вириваютъ частинки ІМ [27]. Абразивний знос проявляється у вигляді подряпин, зрізу внаслідок чого з’являються характерні «борозни», а інтенсивність його залежить від твердості абразивних часток, міцності і твердості поверхневих шарів РІ [27, 28].

Адгезійний знос відбувається через дію адгезійних сил, які виникають в процесі тертя (внаслідок високих температур) в зоні контаку «РІ - оброблюваний матеріал» та полягає у схопленні, налипанні чи зварюванні між стружкою та РІ і, як наслідок у відриві частинок різальної крайки РІ [27]. Під

адгезійним зносом розуміється всі види міжмолекулярної взаємодії між твердими тілами [27].

В результаті дифузійного зносу відбувається перенесення атомів ІМ в деталь і стружку, а також в поверхневих шарах РІ відбуваються структурні перетворення, які викликають збільшену крихкість поверхневих шарів РІ, що призводить до їх знеміцнення і руйнування, інтенсивність дифузійного зносу залежить від температури, пластичної деформаці та сил адгезії в зоні контакту [27].

Окислювальний знос полягає у проникненні газового або рідкого середовища у зону контаку «РІ - оброблюваний матеріал», що викликає безперервне окислення поверхневих шарів РІ та утворення оксидних плівок, які постійно руйнуються і відновлюються [27]. Вони можуть зменшувати інтенсивність зносу (при міцному зчепленні з поверхнею) так і посилювати тертя і знос (при слабкому зчепленні з поверхнею) внаслідок безперервного руйнування [27].

1.3. Аналіз сучасних технологічних методів поверхневого зміцнення різального інструменту із швидкорізальної сталі.

Досягнення підвищеної зносостійкості, тим самим збільшення працездатності та експлуатації РІ зі швидкорізальної сталі здійснюються зміцненням його поверхневих шарів шляхом нанесення зносостійких захисних покриттів, що є ефективним, практичним і доступним способом покращення різальних властивостей інструменту [29].

Питанням збільшення зносостійкості і довговічності РІ, шляхом формування зносостійких покриттів займалися вчені: Верещака А.С. [29, 30], Костюк Г.І. [31-33], Ляшенко Б.А. [34, 35], Антонюк В.С. [36, 37], Григорьев С.М. [7, 38], Табаков В.П. [39-41], Якубов Ф.Я. [17] та ін.

Завдяки сучасним методам нанесення зносостійких покриттів можливо визначати геометричні параметри, форму і структуру робочих поверхонь та їхні

фізико-механічні властивості, що забезпечить ефективність роботи РІ, надасть можливість використовувати різні метали і сплави для нанесення їх на робочі поверхні інструменту з різних матеріалів [42]

Зносостійкі покриття – тонкі плівки (шари), які мають товщину в декілька мікрометрів [43]. Нанесення зносостійких покриттів дозволить отримати сприятливі механічні та експлуатаційні властивості РІ з швидкорізальної сталі – підвищену твердість, міцність, теплостійкість, знизити активність дифузійних процесів, тертя в зоні контаку «РІ - оброблюваний матеріал, покращити пасивність до оброблюваного матеріалу, тріщиностійкість та дозволять замінити дорогі ІМ більш дешевими, що призвиде до збільшення періоду використання РІ до затуплення, дозволить керувати його зношуванням і вплине на якість поверхневого шару оброблюваних деталей [29, 41].

Авторами [29, 44] сформульовані експлуатаційні вимоги до зносостійких покриттів, вони повинні: зберігати свої властивості при високих температурах; бути стійким проти корозії і окислення; не мати дефектів (пор, включень, неоднорідності); володіти більшою твердістю ніж твердість ІМ; мати високу межу витривалості, високу теплостійкість, володіти низькою схильністю до адгезії і мінімальною здатністю до дифузійних процесів з оброблювальним матеріалом.

Автори [42-47] класифікують методи нанесення зносостійких покриттів на чотири основні групи, взалежності від методів їх утворення:

перша група – механічне зміцнення (поверхневе пластичне деформування та інші механічні дії на поверхню сталевих виробів);

- друга група – ХТО, гальванічне осадження, хімічне осадження (CVD);
- третя група – фізичне зміцнення (вакуумні, вакуумно-плазмові технології, електроіскрове легування (ЕІЛ), поверхневе гартування, ЛО);
- четверта група – комбіновані способи зміцнення (ЛО і іонно-плазмова обробка, ЕІЛ і поверхневе пластичне деформування, ЕІЛ і ЛО, порошкові покриття, електронно-променева і електронно-механічна обробка, ЛО і азотування та ін.).

Найбільш поширені методи модифікування робочих поверхонь РІ із швидкорізальних сталей. При здійсненні поверхневого пластичного деформування не відбувається змін хімічного складу і він базується на використанні пластичних властивостей металів і сплавів із яких виготовлений інструмент. При поверхневому пластичнному деформуванні відбувається текстурування і подрібнення структури, роздрібнення і зсув зерен, збільшення щільності дислокацій [38, 44, 47].

За рахунок методу механо-термічної обробки можливо створювати структури з заданими трибологічними властивостями, він полягає у структурних перетвореннях на поверхні сталевих виробів, які виникають в результаті одночасних механічних і теплових впливів [48, 29].

Хімічний спосіб нанесення покриттів полягає у тому, що на поверхні сталевого виробу конденсуються газоподібні з'єднання із наступним утворенням твердих осадів, даний метод дозволяє отримати достатньої міцні поверхневі шари з боридів, карбідів, нітридів, оксидів [38, 49, 50]. Такі покриття мають високу адгезійну міцність, високу щільність і рівну товщину [51]. Утворення покриттів даним методом здійснюється за рахунок комплексної дії реакцій між парогазовими сумішами, які складаються із з’єднань металоносія і носія іншого компоненту, який служить як газ транспортер і відновлювач [38].

До фізичних методів (PVD) відносяться вакуум-плазмові методи утворення покриттів у вакуумі з парової фази, утворення матеріалу нанесення яких здійснюється внаслідок перетворення твердої речовини в пароподібну різними способами (іонне розпилення, електронно-дуговим, лазерним, вакуумною дугою) [38, 52].

Надійним та розповсюдженим методом нанесення зносостійких покриттів є іонно-плазмове осадження у вакуумі (методи магнетронно-іонного розпилення, іонного осадження, конденсація речовини з плазмової фази з іонним бомбардуванням та ін.) [38, 39]. Суть даного методу заключається у випаровуванні різними способами матеріалу, що наноситься, іонізація частинох

їх прискорення і конденсації на поверхні сталевого виробу [39]. Значними перевагами цього методу є технологічність і керованість процесами осадження, хороша адгезія покриттів, можливість нанесення покриттів складного хімічного складу [39].

Основою покриттів, які формуються іонно-плазмовим методом можуть бути бориди, нітриди, карбіди і деякі інші сполуки перехідних металів [53]. Основним матеріалом при нанесенні іонно-плазмових покриттів є TiZrN, TiN, TiAlN, та ін., вони мають хороші фізико-механічні властивості, хорошу зносостійкість при високих температурах, добре наноситься плазмовим напиленням та є хімічно інертними, а також збільшують зносостійкість і працездатність РІ [39, 53, 54].

В роботі [55] показано спосіб збільшення зносостійкості РІ шляхом створення композиційних покриттів, основним зміцнювачем яких можуть бути вуглецеві нанотрубки.

Для зміцнення РІ можуть використовуватись магнітна і магнітно-імпульсна обробку [38, 56]. Таку обробку здійснюють постійним магнітним і магнітно-імпульсним полями. Умови обробки залежать від розмірів і матеріалу інструменту.

ЕІЛ є широко розповсюдженим методом нанесення зносостійких покриттів, який полягає в легуванні поверхневого шару сталевих виробів електродом зі певного матеріалу завдяки іскровому розряді [57, 58]. В якості легуючих матеріалів (електроду) при ЕІЛ можуть бути використані майже будь-які матеріали, завдяки чому можливо в достатньо широких межах змінювати механічні, термічні та інші властивості робочих поверхонь РІ [59, 60]. Спосіб ЕІЛ має такі переваги як простота устаткування, під час нанесення покриття не відбувається розігріву матеріалу основи, що дає можливість зміцнювати сталеві вироби з будь-яких матеріалів та бідь-якої форми, можливість локального легування поверхні, непотрібність попередньої підготовки поверхні [42].

Поширеним методом є зміцнення інструменту ЛО. Лазерне зміцнення дозволяє знизити знос РІ шляхом підвищення його поверхневої твердості при

збереженні високої міцності, підвищити теплостійкість, знизити коефіцієнт тертя. Зміцнення здійснюється по передній або задній поверхнях, або одночасно по двом поверхням [47].

Зміцнення РІ потребує розвиватку нових та вдосконалення вже існуючих технологій. В якості нового методу зміцнення швидкорізальних сталей може бути самопоширюваний високотемпературний синтез. Сутність методу полягає в суміщенні хімічних транспортних реакцій з процесами теплового самозапалювання порошкових самопоширюваного високотемпературного синтезу сумішей. При їх хімічній взаємодії утворюються нові речовини – карбіди, бориди, нітриди та інші, які надають покриттям потрібних трибологічних та експлуатаційних властивостей [61].

Перспективними напрямками розробки сучасних технологій поверхневого зміцнення є синтез комбінованих методів нанесення покриттів на сталеві вироби з утворенням біоплівок [62]. Сутність технології полягає в тому, що біоплівки, які формуються на поверхні сталевих виробів, є місцем взаємодії бактерій циклів сірки, заліза та азоту з металами, тобто місцем протікання біохімічних процесів. Результатом цих процесів є біомінералізація, яка призводить до накопичення біогенних продуктів (елементна сірка, сульфіди, селеніди, квасці тощо), здатних до модифікації контактуючих поверхонь [62].

Аналіз робіт авторів [7, 29, 38, 46, 54, 63] показав, що перспективними та ефективними методами нанесення зносостійких покриттів є комбіновані методи (КМ).

В своїх наукових працях автори А.С. Верещака Л.Ф. Головко, М.В. Кіндрачук, С.А. Клименко, В.Ф. Лабунець, В.Г. Хижняк та ін., досліджували властивості та доцільність використання дискретних, багатошарових і комбінованих покриттів на різних типах сталей, а також встановили, що впливати на зносостійкість і працездатність захисних покриттів можливо за рахунок складу, архітектури, методу нанесення.

КМ представляють поєднання різноманітних методів нанесення покриттів (ЛО і наступне нанесення покриттів, ЛО і наступна ХТО, термічна

обробка і наступний механічний вплив та ін.), внаслідок чого будуть поєднуватись переваги кожного з методів. Практично всі методи нанесення покриттів можливо використовувати в поєднанні один з одним [29, 38].

Використання комбінованих методів зміцнення дозволяє підвищити стійкість до крихкого руйнування, особливо при підвищеній контактній напрузі і циклічному навантаженні, збільшити пластичність, міцність, твердість, зносостійкість, теплостійкість, абразивну та адгезійну стійкості РІ [29, 38].

Ефективність застосування КМ підтверджена багатьма дослідниками.

В роботах [38] показана ефективність застосування комбінованої обробки шляхом нанесення покриття іонно-плазмовим методом (конденсації з іонним бомбардуванням) та попередньою ХТО (іонне азотування) для швидкорізальних сталей та ЛО з наступним нанесення покриттів – попередня ЛО гальмує процеси знеміцнення задньої поверхні РІ, а ЛО після нанесення покриття підвищує його мікротвердість і тріщиностійкість та зміцнює адгезійну стійкість з інструментальною основою. Застосування комбінованої обробки, проведеної по оптимальних режимах, забезпечує збільшення періоду стійкості РІ в 1,5-3 рази в порівнянні з традиційним покриттям взалежності від варіанту обробки [38].

Також автором [38] зазначається, що комбінована обробка, яка включає попереднє азотування і наступне нанесення покриттів, дозволяє збільшити стійкість РІ з швидкорізальної сталі до 5 раз в порівнянні з РІ без зміцнення і до 3 разів в порівнянні з РІ одношаровим покриттям.

Авторами [63] досліджено зносостійкість сталі Р6М5 та встановлено, що комбіноване покриття, отримане ЛО суцільного боридного шару, яке нанесене на сталь Р6М5, підвищує її зносостійкість у 2…3,5 рази.

Ефективність та перспективність комбінованих електролітичних покриттів на основі нікелю та комбінування методів ЕІЛ і плазмового напилювання показана автором [64].

Розроблений авторами [65] КМ нанесення зносостійких покриттів багаторазовою попередньою поверхневою пластичною деформацією кулькою і

наступним ЕІЛ твердим сплавом – ЕІЛ з наступним поверхневим пластичним деформуванням кулькою показав, що дане комбіноване покриття володіє високою зносостійкістю і твердістю, а також адгезійною стійкістю у 4 – 5 разів на початковій стадії та в 2 – 2,5 рази надалі.

Авторами [66] встановлено, що поєднання ЛО та ЕІЛ покращує експлуатаційні характеристики сталевих виробів, підвищуючи мікротвердість покриття і опір зносу і знижуючи шорсткість поверхні.

Авторами [67] розроблено та досліджено комбіновану обробку, яка включає попереднє азотування з наступним нанесенням наноструктурованого багатошарово-композиційного покриття на швидкорізальну сталь Р6М5, та показано, що період стійкості фрез та свердел збільшився до 4 разів в порівнянні з періодом їх стійкості без покриття.

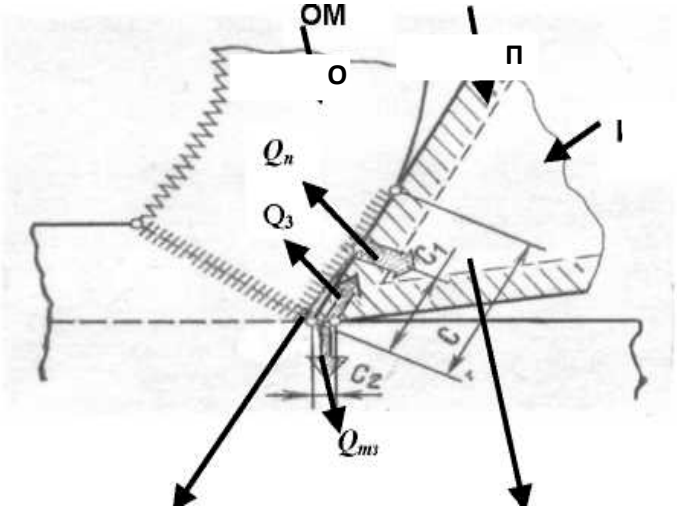
На даний час знайшли широке розповсюдження багатошарові покриття, які забезпечують покращення показників зносостійкості та поєднують необхідні характеристики – в’язкість, твердість, міцність, низький коефіцієнт тертя, теплостійкість, покращують адгезію і сприяють регулюванню залишкових напружень [68-70].

Багато авторів зазначають, що за рахунок складу, архітектури, методу нанесення захисних покриттів та їх комбінацій можливо впливати на триботехнічні властивості і працездатність покриттів.

Автори [67, 68] розглядають функціональну роль покриття на різальних крайках РІ, як деяке «проміжне технологічне середовище» з подвійною природою між інструментальним і оброблюваним матеріалами (рис. 1.1). З одного боку, покриття підвищує такі важливі властивості ІМ як твердість, теплостійкість, зносостійкість, фізико-хімічна пасивність по відношенню до оброблюваного матеріалу, зносостійкість, з іншого – сприятливо впливає на контактні процеси і параметри різання, що визначає зношування інструменту.

За рахунок нанесення багатошарових покриттів можливо забезпечити надзвичайно важливі функції пов'язані з підвищенням опірності втомному руйнуванню при впливі циклічних термомеханічних напружень, які приводять

до формування і розвитку втомних тріщин; формування належних за рівнем і знаком залишкових напружень; гальмуванням (блокуванням) теплових потоків від фрикційних джерел тепла в інструмент і оброблювану поверхню, а також інтердіфузії між інструментальним і оброблюваних матеріалами тощо [67, 68].



Роль покриттів на границях контакту оброблюваний матеріал - покриття

- зниження фізико-хімічної активності ІМ по відношенню до оброблюваного матеріалу;
- зниження тертя на площадках контактної довжини C та C_2;
- зниження роботи фрикційних джерел тепла $Q_{t\alpha}$ та $Q_{t\gamma}$;
- зниження інтенсивності теплових потоків Q_n, Q_3, Q_{m3};
- зменшення інтенсивності дифузійних процесів між контактуючими ІМ та оброблюваний матеріал

Роль покриттів на границях контакту – покриття - ІМ

- підвищення поверхневої твердості ІМ;
- підвищення поверхневої теплостійкості ІМ;
- підвищення зносостійкості ІМ;
- зниження теплопровідності ІМ;
- створення бар'єру дифузійним процесам між контактуючими ІМ та оброблюваний матеріал;
- створення перешкоди тепловим потокам з зон тертя до ІМ

Результат: зниження тертя, сил різання, контактної температури, теплової напруженості РІ та деталі; зменшення інтенсивності зношування РІ та підвищення якості поверхні оброблюваного матеріалу.

Рис. 1.1. Схематичне зображення технологічної системи обробки різанням, що дає загальнене уявлення про подвійну природу покриттів на робочих поверхнях інструменту: Q_n, Q_3, Q_{m3} – теплові потоки в інструмент і оброблюваний виріб від фрикційних джерел тепла; С і C_2 – довжини контакту по передній і задній поверхнях РІ [67, 68].

Для отримання найсприятливіших властивостей архітектуру багатошарового покриття найдоцільніше базувати на основі трьохелементної

системи, що включає адгезійний підшар 3, проміжний шар 2 і зносостійкий шар 1 (рис. 1.2) [67, 68].

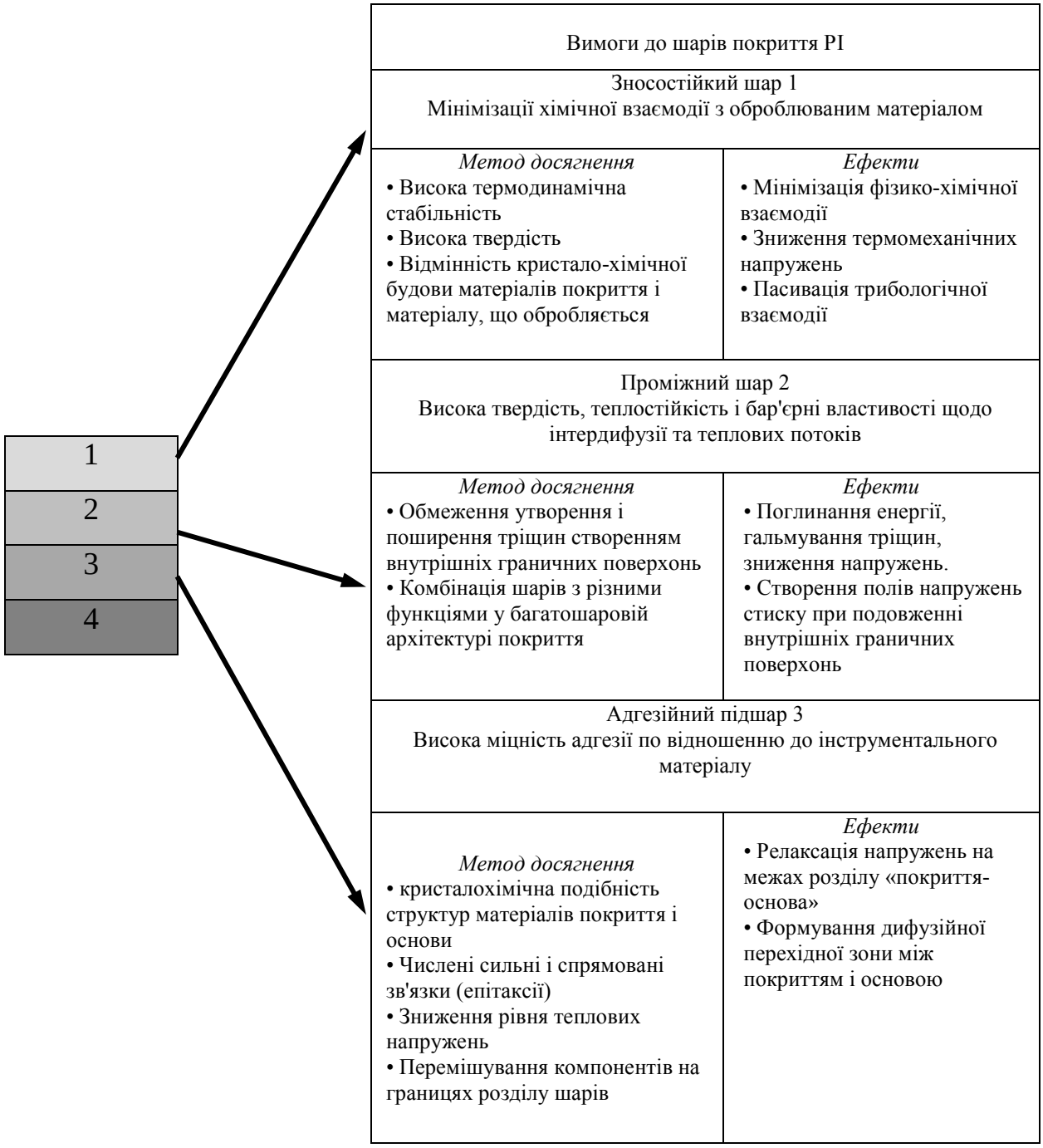


Рис. 1.2 – Систематизація основних вимог до шарів багатошарового покриття: 1 – зовнішній (зносостійкий) шар; 2 – проміжний (бар'єрний) шар; 3 – адгезійний підшар; 4 – ІМ [67, 68].

Внаслідок аналізу систематизованих вимог до покриття слід відзначить, що одношарові покриття не задовольняють усім функціональним вимогам до

покриттів для РІ. Найбільшою мірою таким вимогам відповідають багатошарові покриття з шарами різного функціонального призначення, покриття подібної архітектури слід формувать відповідно до принципів функціональності кожного з шарів (рис. 1.2) [67, 68]. Оптимізацію структури багатошарових покриттів можливо виконувать шляхом складу, фізичними властивостями, параметрами шарів, за рахунок досліджень їх триботехнічних властивостей, а архітектура таких покриттів містить декілька шарів, що мають своє функціональне призначення (рис.1.2) [67, 68].

Володіти хорошою хімічною сумісністю і забезпечувати міцну адгезію з ІМ повинен адгезійний підшар 3 [67, 68]. Перехідний шар 2 повинен згладжувати відмінність кристалохімічних властивостей шарів 1 і 3, і, крім того, блокувати теплові потоки від фрикційних джерел тепла в основу і інтердіфузію між інструментальним і оброблюваним матеріалами (бар'єрні функції), шар 1 повинен мати високу зносостійкість, мінімальну сумісність кристалохімічних властивостей з матеріалом основи, підвищену твердість, максимальну опірність макро- і мікро руйнування при термомеханічних напружених, що виникають при різанні [67, 68].

Кожен з шарів багатошарових покриттів, у свою чергу, може мати багатошарову структуру, що підвищує опірність крихкому руйнуванню та хороше припрацювання [67, 68].

У роботах [71, 72] розроблені багатошарові покриття з нанорозмірною структурою Ti-(Ti,Cr)N-TiN, Ti-TiN-TiAlN-TiN, які наносили вакуумно-дуговим осадженням на інструменти з швидкорізальної сталі, твердого сплаву та взалежності від вибору матеріалу кожного шару його послідовності і товщини дозволяють керувати екплуатаційними характеристиками РІ з покриттям і забезпечують підвищення стійкості РІ до 1,5..5 разів в порівнянні із стандартним покриттям.

В роботі [73] розроблено технологію нанесення багатошарових покриттів на основі нітриду Ti і Zr на матеріали Р6М5 і ВК8, яка дозволяє збільшити зносостійкість, тріщиностійкість, мікротвердість, опір пластичної деформації,

збільшити теплостійкість РІ. В даній роботі встановлено, що адгезійна міцність шарів збільшується при нанесенні проміжних шарів з Ti і Zr між кожним наступним і попереднім шарами.

В роботі [74] сформульовано принципи формування та експлуатації багатошарових покриттів композиційного типу. Формування їх здійснюється шляхом нанесення покриття методом КІБ, та іонною ХТО з використанням дугових джерел плазми.

Авторами [75] було досліджено властивості і структуру покриття TIN нанесеного лазерно-плазмово-іонним методом на швидкорізальну сталь Р6М5. Показана можливість комбінованого зміцнення сталі Р6М5, що дозволяє підвищити стійкість РІ більше ніж у 2,5 раз у порівнянні з покриттям TIN.

Автором [76] показано досягнення високої теплостійкості багатошарового покриття з проміжним шаром Al_2O_3 на РІ.

Щоб підвищити зносостійкість РІ широко використовуються градієнтні покриття. За допомогою градієнтних покриттів, які поєднують плавну зміну властивостей і складу по товщині можливо поєднувати різні трибологічні властивості на одній поверхні: створити благоприємний НДС покриття з основою, покращити процес припрацювання, теплостійкість, збільшити зносостійкість і в'язкість та зменшити коефіцієнт тертя [77, 78].

Авторами [79] представлені результати досліджень структури та механічних властивостей градієнтних покриттів системи TiN/(Ti,Al,Si)N/TiN на зразках з металокерамічних матеріалів і твердих сплавів.

Автори [80] проводили дослідження процесу нанесення градієнтних покриттів на основі карбіду титану та карбіду хрому типу Ni - Co - Cr - Ti - C за допомогою електронно-променевого випаровування і конденсації у вакуумі сумішей порошків елементів, що входять до складу покриттів. Дані покриття мають високі значення мікротвердості, зносостійкість, міцності, в'язкості і твердості.

Перспективним напрямком створення зносостійких покриттів на РІ є розробка дискретних покриттів (ДП), які враховують недоліки суцільних

покриттів і значно підвищують експлуатаційні характеристики РІ [42]. ДП за рахунок створення дискретної архітектури поверхні тертя її розмірів і кількості дискретних ділянок дають можливість значно збільшити її зносостійкість, мінімізувати НДС, регулювати температурний режим, досягати мінімального коефіцієнта тертя та управляти трибологічними властивостями [81, 82]. Через більшу твердість, товщину, геометрію і глибину втілення в поверхню, дискретні ділянки знижують концентрацію напруги збільшуючи при цьому тріщиностійкість та стійкість до пластичної деформації [82, 83]. Щоб отримати дискретну структуру покриття можливо використовувати ЕІЛ, плазмову обробку, ЛО, іонну імплантацію та ін. [81-83].

Авторами [35] запропоновано підвищення зносостійкості РІ шляхом формування на його поверхні покриттів дискретної структури з оптимальними параметрами (щільність, розмір дискретних ділянок, рівень залишкових напружень).

Авторами [84] було встановлено, що РІ з швидкорізальних сталей, твердих сплавів і кераміки на які нанесені дискретні покриття, мають більшу зносостійкість і забезпечують отримання обробленої поверхні з меншою шорсткістю.

Автор [85] показав доцільність використання дискретних покриттів, вплив виду покриттів на стійкість РІ, а також розробив технологічний процес нанесення зносостійких покриттів дискретного типу на основі нітридів та карбідів титану, що дозволяє підвищити його стійкість в 1,5...2,2 рази.

1.4. Вибір методів нанесення покриттів для комбінованої обробки різального інструменту із швидкорізальної сталі Р6М5

Лазерна обробка. Перспективним, надійним та дешевим методом підвищення зносостійкості РІ зі швидкорізальних сталей є створення ДП шляхом обробки поверхні концентрованими джерелами енергії [86-90]. Такі покриття дозволяють забезпечувати потрібні триботехнічні та експлуатаційні

показники і благоприємний НДС покриття, керувати характеристиками і властивостями покриттів за рахунок зміни структури, геометрії, фізико-механічних властивостей поверхневих шарів, збільшити зносостійкість РІ шляхом підвищення його поверхневої твердості, міцності, теплостійкості за рахунок зниження коефіцієнта тертя, забезпечувати автоматизацію процесу, здійснювати тепловий вплив тільки на ті місця де потрібна обробка, що призводить до мінімуму можливість деформації оброблюваних сталевих виробів, а також дозволяє обробляти деталі будь-якої форми [42, 88, 91, 92].

За рахунок того, що можливо регулювати щільність потужності, тривалість нагріву і охолодження, локальності теплової дії та обробки в будь-якій атмосфері, можливо отримати різноманітніні структури і властивості обробленої поверхні [93, 94].

На товщину зміцненого шару та експлуатаційні характеристики РІ мають вплив час імпульсу, щільність, потужність лазерного випромінювання [95, 96].

При ЛО можливо застосовувати різні схеми, як з перекриттям так і без [38, 86, 97]. ЛО здійснюється безперервним або імпульсним випромінюванням. Безперервна ЛО при довготривалому впливі на поверхню сталевого виробу призводить до збільшення геометричних розмірів зміцнених зон, а також можливо змінювати структуру і властивості, рівномірність зміцнених шарів, при імпульсному випромінюванні за рахунок зменшення розфокусування лазерного променя [98].

Внаслідок ЛО можливо здійснити лазерне легування, яке полягає в тому, що експлуатаційні показники оброблених поверхонь досягаються не тільки за рахунок структурних і фазових перетворень в місці лазерної дії, але і через створення нового розплаву на основі матричного матеріалу з особливим хімічним складом [98, 99].

ЛО є перспективним методом зміцнення поверхневих шарів РІ, тому що разом з перевагами ЛО можливо створити на оброблюваній поверхні виробу неоднорідної макроструктури як вглибину матеріалу, так і в ширині ділянок, які відрізняються фізико-механічними і триботехнічними властивостями [92, 100].

Як встановлено авторами [101] стійкість РІ після ЛО в 5-10 разів вища, ніж після традиційної термообробки.

Суть зміцнення поверхневих шарів при ЛО полягає у дії потужного світлового пучка великої густини енергії, що викликає локальне їх нагрівання до високих температур, які можуть перевищувати не тільки температуру структурно-фазових перетворень в сталі, але і температуру плавлення [101]. Завдяки цьому утворюються структури з необхідними триботехнічними та експлуатаційними властивостями.

Перспективою подальшого використання ЛО є створення комбінованих методів, де ЛО поєднується з різними процесами нанесення покриттів для підвищення фізико-механічних і триботехнічних властивостей сталі Р6М5, що буде здійснено в даній роботі.

Методи ХТО. Найбільш поширеними і добре зарекомендованими методами нанесення зносостійких покриттів є ХТО за допомогою якої можливо отримати необхідні фізико-механічні і триботехнічні властивості сталі Р6М5 [102, 103]

Здійснення ХТО засновано на явищі дифузії атомів легуючих елементів в поверхневі шарі сталевих виробів. У результаті цього в поверхневому шарі виникають хімічні сполуки основного металу з легуючими елементами (карбіди, нітриди і т.д.), фізико-механічні властивості яких істотно вищі порівняно з вихідним матеріалом [102, 104].

Методами ХТО є борування, азотування, нітроцементація, цементація, сіліціювання, ціанування, алітування, хромування, титанування [105, 106]. Завдяки цим технологічним операціям ХТО, можливо підвищити зносостійкість РІ за рахунок створення на його поверхні шарів з підвищеною твердістю. *Дифузійна металізація (ДМ)*. Для комплексного підвищення зносостійкості сталевих виробів перспективним є насичення їх поверхні різними металами шляхом багатокомпонентної ДМ – поверхневе насичення сталевих виробів елементами, які утворюють карбіди, наприклад бором, алюмінієм, хромом, кремнієм та ін., для того, щоб отримати комплексні дифузійні покриття іншого

складу і структури, а також властивостей (хромосиліціювання, алюмованадіювання, боротитанування, титанованадіювання, хромотитаноалітування) [102, 107].

Дифузійні покриття є поширеним способом підвищення працездатності сталевих виробів в різних експлуатаційних умовах, оскільки при ДМ відбувається легування поверхневих шарів виробу елементом покриття з утворенням твердих розчинів, перехідних з'єднань та їх високою щільністю [104].

За рахунок ДМ можливо отримати такі властивості, як високу жаростійкість, корозійну стійкість, підвищену твердість та зносостійкість [102]. На високі характеристики дифузійних покриттів впливають склад, структура, товщина покриття, розподіл концентрації елементів по покриттю, а також властивості основного матеріалу. Дані параметри залежать від способів і режимів процесу ДМ і від природи дифундуючих елементів [104].

При ДМ, завдяки підвищеним температурам, утворюються дифузійні покриття з особливим хімічним складом і властивостями ніж у вихідного ІМ, в результаті чого покращуються його експлуатаційні властивості [104]. Швидкість утворення покриття, структура і його властивості залежать від температури процесу ХТО, часу насичення, швидкості перебігу дифузії, а також від хімічного складу і структури ІМ [104]. При цьому проходять такі процеси, як утворення та поглинання активних насичуючих атомів елементів оброблюваною поверхнею і наступне дифузійне переміщення даних атомів всередину виробу [102]. Дифузійні покриття до складу яких входять тверді розчини насичуючих елементів або хімічні сполуки в основному наносяться в ізотермічних умовах у штучно створених насичуючих середовищах при прямому або напрямому контакті [102].

Такі відомі вчені як Хижняк В. Г. [108, 109, 110], Лоскутова Т. В. [111, 112] вирішували питання збільшення фізико-механічних властивостей і зносостійкості сталевих виробів та твердосплавних інструментів за рахунок комплексного насичення методами ХТО, зокрема ДМ різними карбідоутворюючими елементами.

Авторами [113-115] проведено перспективні дослідження насичення поверхні сталей і твердих сплавів одним або декількома карбідоутворюючими елементами (ванадієм, титаном, хромом та ін.) в одному технологічному циклі та показано, що формуються карбіди і нітриди з прийнятними технологічними характеристиками (товщиною і високою мікротвердістю).

ДМ здійснюється різними методами, зокрема твердофазним, рідкофазним, газофазним та парофазним методами [102, 104]. Відносно простим, екологічним та поширеним є здійснення ДМ в газовому середовищі хлоридів металів, між хлоридом та залізом протікає реакція обміну, в результаті, якої утворюється активний атомарний елемент, який дифундує в поверхневий шар [104].

При нанесенні покриттів на поверхневі шари сталевих виробів шляхом ДМ твердофазним способом поверхня оброблюваного виробу знаходиться в прямому контакті з дифундуючим елементом, який перебуває в твердій фазі [102, 104]. Перевагою даного методу є його простота процесу, а недоліком - зварювання частинок насичуючого матеріалу з оброблюваною поверхнею і в деяких випадках є шкідливим [102, 104].

Насичення з рідкофазним способом здійснюється зануренням оброблюваних виробів у розплав, в якому дифундуючий елемент перебуває у вигляді хімічної сполуки [102, 104]. Перевагами даного методу є простота технологічного устаткування, економічність, можливість можливість обробляти вироби будь-якого розміру, керування процесом насичення, можливість багаторазового використання розплаву, до недоліків відносяться великі витрати компонентів, низька стійкість ванни до розплаву, летучість компонентів [102, 104].

Насиченя з парової фази полягає у тому, що реакційне середовище утворюється за рахунок випаровування насичуючого елементу з його подальшим осіданням на оброблювальній поверхні сталевого виробу, здійснюється контактним і безконтактним способом [102, 104]. Основною перевагою даного методу є висока якість покриттів та їх пластичність.

Недоліками цього методу є складність технологічного устаткування і великі витрати насичуючих елементів [104].

Насичення поверхневих шарів сталевих виробів газофазним способом заключається у виділенні насичувального елементу в атомарному стані з газової фази внаслідок взаємодії газової фази до складу якої входить насичувальний елемент у вигляді хімічної сполуки з поверхнею виробу, а також при взаємодії з газом-відновником [102]. Перевагами даного методу є технологічна простота процесу та отримання якісного покриття. Недоліками є висока енергоємність і тривалість процесу, погіршення чистоти поверхні виробів, непродуктивність витрат компонентів суміші, погана керованість процесом [102, 108]. Для прискорення процесів дифузійного насичення з газової фази, зниження витрати складових реагентів газового середовища і зменшення шкідливості роботи використовують циркуляційний спосіб насичення в замкнутому середовищі при постійному відновленні газу-переносника, який відрізняється високою якістю покриттів, економічністю, а також екологічно безпечний [108, 116]. Для насичення можливо використовувати порошки тугоплавких металів IV-VI груп періодичної системи [114, 115].

Проте, незважаючи на перваги, ДМ для підвищення зносостійкості поверхневих шарів РІ зі швидкорізальних сталей використовується дуже обмежено, що пояснюється невідпрацьованою технологією (основний недолік – ДМ здійснюється при високих температурах ~ 1000 °С) і малим вивченням її впливу на властивості швидкорізальних сталей. Передбачаєть, що додаткова ЛО після ДМ підвищить фізико-механічні і триботехнічні властивості сталі Р6М5, що буде досліджено в даній роботі.

Азотування. Процес азотування здійснюється за рахунок дифузійного насичення поверхневого шару РІ азотом [102]. Азот здійснює значний вплив на структуру та властивості сталевих виробів [117]. Після азотування покращуються міцність, при цьому не знижується пластичність, зростає втомна міцність, корозійна стійкість, теплостійкість, а також майже не відбувається

деформації виробів [118]. Введення азоту також підвищує зносостійкість і червоностійкість швидкорізальних сталей, за рахунок чого покращуються різальні властивості інструменту [102, 104].

Для якісного підвищення експлуатаційних характеристик швидкорізальних сталей при азотуванні потрібно правильного проведення попереднього очищення поверхні, а також додержання заходів усунення зневуглецювання [104]. Газове азотування РІ із швидкорізальної сталі (при t до 550 °С) більш поширеніше ніж всі інші види [104].

Взаємодія азоту з металами при високих температурах призводить до формування нітридів [104].

Азотування газовим способом здійснюється в атмосфері аміаку. Аміак дисоціює на поверхні сталі відповідно реакції, в результаті якої атоми азоту адсорбуються на поверхні та дифундують вглиб матеріалу. Через відносно низькі температури азотування та через те, що азот реагує з елементами легованих сталей в процесі дифузії, час азотування доволі великий і коливається в межах 10 - 36 годин. Глибина нітридного шару відносно мала – 0,1…0,4 мм. [104, 108].

Недоліком азотування є необхідність нагрівання поверхневих шарів швидкорізальних сталей до високих температур та тривала витримка при цих температурах для того, щоб отримати прийнятну товщину азотованого шару. Підвищення температури є небажаним, оскільки призводить до росту зерна та погіршенням механічних властивостей крім того такий процес потребує великих енергозатрат. В зв’язку з цим потрібно здійснювати пошук нових способів інтенсифікації процесу масоперенесення в умовах азотування сталевих виробів. Також азотований шар є крихким.

В даному дисертаційному дослідженні було поставлено задачу пришвидшити дифузію атомів азоту в поверхневі шари швидкорізальної сталі Р6М5 та підвищити її триботехнічні властивості за рахунок попередньої ЛО.

Іонно-плазмове напилення. Іонно-плазмове напилення – це спосіб

напилення металевого покриття, яке наносять в середовищі реактивного газу (азоту) у вакуумній камері, де розпилюваний матеріал за рахунок тепла електричної дуги перетворюється в плазмовий стан і переноситься до робочої поверхні зразка, на яку подають від' ємний потенціал позитивно зарядженими іонами металевої плазми [29, 39].

Формування поверхневих шарів швидкорізальних сталей із тугоплавких нітридів, карбідів і інших металів дозволяє досягти їх високої зносостійкості. Широке впровадження даного методу в різні технологічні процеси обумовлене високою продуктивністю, екологічністю, автоватизацією та можливістю отримання покриттів практично з будь-якого матеріалу і заданого складу, висока керованість процесом, краща адгезія покриттів до поверхні [29, 39]. За рахунок вакуумної технології можливо зробити процес нанесення покриттів «замкнутим» [39]. Суть методів іонно-плазмового напилення полягає в обробці поверхні зразків іонами необхідних матеріалів і вибиванні атомів (молекул) з зразків, енергія іонів при цьому становить величину порядку сотень і тисяч еВ, утворений атомний потік прямує на підкладку, де відбувається конденсація речовини і формується покриття [29, 39].

Для нанесення зносостійких покриттів використовують різні хімічні елементи, тугоплавкі з'єднання перехідних матеріалів IV–VI груп періодичної системи такі як карбід титана TiC, нітрид титана TiN, карбід гафнію HfC, карбід цирконію ZrC, оксид алюмінію Al_2O_3 та ін., що пов'язано з особливостями кристалохімічної будови цих металів [29, 39]. Ці з'єднання перехідних матеріалів володіють високою мікротвердістю і мають широкі області гомогенності, що дозволяє в значній мірі змінювати їх фізико-механічні властивості взалежності від умов їх застосування, також такі сполуки є термодинамічно найбільш стійкими і протистояти окисленню при підвищених температурах [29, 39]

З аналізу досліджень іонно-плазмового напилення TiN покриттів для того, щоб визначити шляхи вдосконалення і розробки нових технологій

зміцнення інструменту випливають наступні висновки: підвищення зносостійкості РІ зі сталі Р6М5 за рахунок нанесення TiN покриття можливо тільки при дотриманні оптимізованого технологічного процесу, при цьому температура нагріву інструменту для хороших адгезійних властивостей повинна знаходитися в діапазоні 500-550 ºС; нанесення покриттів повинно здійснюваатися на основу РІ, яка слугує підкладкою під покриттям, так, щоб повністю були відсутні зміни її фізико-механічних властивостей, а ефект зміцнення досягався тільки за рахунок покриття; товщина іонно-плазмових TiN покриттів залежить від розташування інструменту відносно випаровувача у вакуумній камері, а також від різної товщинни виробу і умов його кріплення до оснащення; мікротвердість TiN покриття залежить від його товщини [39, 119]. На швидкорізальних сталях спостерігається знеміцнення основи при неоптимальній температурі іонного очищення і підігрівання [120].

Нанесення зносостійких покриттів іонно-плазмовим напилення є широко поширеним за рахунок розповсюдження установок для нанесення покриттів майже на всіх машинобудівних та інструментальних підприємствах.

Проте для нанесення іонно-плазмових покриттів високої якості (зменшити пористість, тріщиноутворення та ін.) на швидкорізальну сталь Р6М5 потрібно підвищить температуру їх нанесення, що можливо внаслідок підвищення теплостійкості сталі.

Створення іонно-плазмових БГП на швидкорізальних сталях, зокрема марки Р6М5, дозволить підвищити не тільки зносостійкість РІ, а й покращити просеси його припрацювання при МО.

На даний час існує велика кількість методів нанесення зносостійких покриттів проте, незважаючи не це, проблема підвищення зносостійкості і працездатності РІ зі швидкорізальних сталей залишається відкритою. Постійно тривають пошуки створення нових методів отримання зносостійких покриттів та удосконалення вже існуючих. В результаті дослідження сучасних методів зміцнення поверхневих шарів РІ (п. 1.3) виявлено велику кількість методів поверхневого зміцнення. Проте, одношарові покриття, отримані за допомогою

більшості з них, не завжди відповідають вимогам, що висуваються до покриттів, які придатні для підвищення зносостійкості і працездатності РІ.

З проведеного аналізу процесів та умов взаємодії в системі «РІ-оброблюваний матеріал» можливо виділити ряд критеріїв для здійснення вибору технологічних методів нанесення зносостійких покриттів: сукупність підвищеної твердості, міцності з певним запасом пластичності для запобігання тріщиноутворення і відшарування покриття; висока адгезія покриття до ІМ, релаксації надлишкових напружень; невелика товщина покриття та ін. Крім того, обрані технологічні методи поверхневого зміцнення повинні відповідати вимогам екологічності, енергоефективності, рентабельності виробництва, а також забезпечувати можливість максимальної автоматизації процесу та високої його продуктивності.

Зазначені вище методи отримання покриттів (п. 1.4) при їх поєднанні, в значній мірі, порівняно з іншими, відповідають визначеним критеріям, технології їх отримання є поширеними та перспективними для подальшої розробки і впровадження.

Як вже зазначалось, сучасними та перспективними методами є комбіновані, які дозволяють поєднувати переваги кожного з методів. З літературного аналізу визначено, що поєднання таких методів як ЛО та азотування, ЛО та ДМ, створення іонно-плазмових БГП та покращення технології нанесення іонно-плазмового покриття TiN дозволить підвищити фізико-механічні та триботехнічні властивості швидкорізальної сталі Р6М5. Це забезпечить збільшення зносостійкості і, як наслідок працездатності РІ із сталі Р6М5 та значну економію матеріально-технічних, людських, часових ресурсів за рахунок керування процесами контактної взаємодії в системі «РІ-оброблюваний матеріал», скороченню матеріальних затрат на його виготовлення, підвищенню продуктивності МО матеріалів з одночасним покращенням якості кінцевих виробів. Це сприятиме підвищенню конкурентноспроможності інструментальної промисловості, а також продукції вітчизняного авіакосмічного та загального машинобудування на світовому ринку.

1.5. Висновки до розділу та постанова наукових задач дослідження.

1. Проведено літературний аналіз причин та характеру руйнування РІ із швидкорізальної сталі Р6М5, показано, що його довговічність і працездатність в залежності від різних умовах експлуатації визначаються зносостійкістю ІМ, фізико-хімічними процесами, які виникають на його поверхневих шарах при контакті з оброблюваним матеріалом під час МО, а також встановлені основні види зношування, що виникають на різальних крайках інструменту і призводять до передчасного виходу його з ладу.

2. Внаслідок проведеного аналізу методів поверхневого зміцнення РІ із швидкорізальних сталей визначено, що нанесення на його поверхні зносостійких покриттів є ефективним, практичним і доступним способом поліпшення його різальних і триботехнічних властивостей, проте одношарові покриття не можуть забезпечити необхідний комплекс експлуатаційних і фізико-механічних властивостей, через що найбільш перспективним методом зміцнення його поверхневих шарів є створення КМ нанесення покриттів, що надасть можливість збільшити зносостійкість і працездатність РІ зі сталі Р6М5.

3. Визначено, що утворення дискретних покриттів шляхом попередньої ДЛО та наступної ХТО чи нанесення покриттів іонно-плазмовим методом на поверхні РІ зі швидкорізальних сталей можливо керувати його характеристиками за рахунок регулювання структури та фізико-механічних властивостей поверхневих шарів. Це дозволить значно підвищити зносостійкість швидкорізальних сталей та створити благоприємний НДС їх поверхневих шарів з комбінованим покриттям.

4. Перспективним шляхом збільшення зносостійкості швидкорізальних сталей є методи ХТО (азотування та багатокомпонентна ДМ), за рахунок чого можливо отримати комплекс необхідних властивостей, що призвиде до підвищення зносостійкості РІ із сталі Р6М5 при різних експлуатаційних умовах.

5. За рахунок створення БГП можливо підвищити структурну пристосовуваність та зносостійкість РІ із сталі Р6М5, а покращення технології

нанесення іонно-плазмових покриттів для отримання їх підвищеної якості можливе за допомогою підвищення теплостійкості сталі, яка є підкладкою під покриттям.

6. Вибрані методи отримання покриттів для комбінованого зміцнення поверхневих шарів швидкорізальної сталі Р6М5 при їх поєднанні відповідають визначеним критеріям (підвищена твердість, міцність, запас пластичності, висока адгезія покриття до ІМ, релаксації надлишкових напружень, невелика товщина покриття та ін), а технології їх отримання є поширеними та перспективними для подальшої розробки і впровадження.

7. Для того, щоб впровадити розроблені комбіновані технологічні методи зміцнення РІ із сталі Р6М5 у практику на інструментальних підприємствах необхідне проведення досліджень їх триботехнічних властивостей та наукового обгрунтування методики вибору раціональних технологічних режимів їх нанесення.

Виходячи з вищесказаного, метою 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.

РОЗДІЛ 2
МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Одним з найважливіших питань при дослідженні триботехнічних властивостей матеріалів і покриттів є організація комплексних наукових досліджень. Правильно підібраний комплекс методів випробувань і досліджень надасть можливість спрогнозувати вибір параметрів нанесення покриттів на РІ з заданими триботехнічними властивостями.

В роботі були використані сучасні методи досліджень структури та фізико-механічних властивостей сталі Р6М5 з покриттями та проведення експериментів: металографічний, рентгеноструктурний, мікрорентгеноспектральний та дюрометричний методи аналізу; триботехнічні випробування на зносостійкість сталі Р6М5 із покриттями в умовах тертя ковзання без змащування, абразивну зносостійкість в умовах нежорстко закріплених абразивних частинок, стійкість РІ в умовах точіння, визначали ваговий знос. Здійснено вибір комплексної методики проведення триботехнічних досліджень та формування зносостійких покриттів, а також дослідження їх структурно-фазового складу і фізико-механічних властивостей з використанням сучасних методів аналізу.

В якості досліджуваного матеріалу вибрано найпоширенішу швидкорізальну сталь марки Р6М5 яку використовують для виготовлення багатьох видів РІ. Зразки з даної марки сталі виготовляли шляхом МО на фрезерних та шліфувальних верстатах.

2.1. Методика здійснення азотування та дифузійної металізації

Процес азотування проводили протягом 1-36 год в шахтній печі СШОЛ-4.4./6 при температурі 540 ^{0}С в середовищі аміаку при ступені його дисоціації 45-60 % [108].

Насичення поверхні дослідних зразків титаном та хромом здійснювали в замкнутому реакційному просторі в умовах зниженого тиску газової фази на спеціальній установці на базі шахтної печі СШОЛ 1.1.6/12 [108], протягом 4 годин. В якості насичуючих елементів використовували порошки титану і хрому та чотирихлористий вуглець (CCl_4). Чотирихлористий вуглець (CCl_4) вводили для того щоб збільшити насичення вуглецем та для транспортування титану та хрому до оброблюваної поверхні зразків зі сталі Р6М5, для підвищення навуглецьовуючої здатності насичуючого середовища ще додатково додавали деревне вугілля [108].

2.2. Лазерна обробка зразків

Зміцнення зразків із швидкорізальної сталі Р6М5 ЛО здійснювали на установці ЛАТУС – 31, на безперервному CO_2 – лазері зі щільністю зміцнених ділянок 70-75 % з потужністю випромінювання 10^3-10^8 Вт/см^2, ділянки фокусування променя – 5 мм, швидкість пересування лазерного променя – 0,5; 0,8; 1,2 м/хв.

2.3. Методика і установка для нанесення покриттів іонно-плазмовим методом

Нанесення зносостійких іонно-плазмових покриттів TiN здійснювали на установці типу «Булат» за відомою технологією при температурах 550 – 560 °С [121]. В якості матеріалів катодів, що випаровується використовували титан марки ВТ 1-00.

Нанесення БГП здійснювали так [122]: на дослідні зразки зі сталі Р6М5, які попередньо підготовляли, завантажують в спеціальний пристрій, що забезпечує обертання зразків навколо осі і по кругу. Зразки промивали в ультразвуковій ванні, протирали спиртом і установлювали на поворотному пристрої у вакуумній

камері установки для нанесення покриттів способом вакуумно-дугового осадження двома випарниками, що розташовані горизонтально в одній площі. Як катоди металу, що випаровується, використовують титан марки ВТ 1-00 - при нанесенні шару Ti, та цільно-литий матеріал, отриманий методом вакуумно-дугового переплаву, при нанесенні шару Ti-Hf-Si-N. Шар із титану осаджували при імпульсній високочастотній напрузі 100 В. Шар із Ti-Hf-Si-N осаджували в середовищі реакційного газу - азоту при напрузі на підкладці 200 В. Струм дуги для нанесення покриття із Ti дорівнював 90 А, а для шару Ti-Hf-Si-N – 100 А. Камеру відкачують до тиску 6,65 × 10^{-3} Па, вмикають поворотний пристрій, подаючи на нього імпульсну високочастотну напругу 2 кВ, вмикають один випарник титану і при струмі 90 А здійснюють іонне очищення пластин і нагрівання пластин до температури 500-550 °С. Шар Ti товщиною 0,1-0,7 мкм наносять на пластину протягом 1 хвилини. Шари Ti-Hf-Si-N товщиною 4,7 мкм і 0,3 мкм наносять протягом 20 хвилин і 1 хвилини відповідно. Вимикають випарник, припиняють подачу реакційного газу до камери. Камеру відкривають через 20-25 хвилин і вилучають зразки з нанесеним покриттям.

Нанесення покриття TiN за запропонованою в роботі технологією наносили так [123]: підготовлені зразки завантажують в спеціальний пристрій, що забезпечує обертання зразків навколо осі і по кругу. Потім відкачують камеру до тиску 4,5 – 6,5 × 10^{-3} Па і здійснюють іонне очищення зразків за прискорюючої напруги 1,0 – 1,2 кВ при одному працюючому випарнику. Після цього зразки прогрівають до значення температури порядку 450 – 500 °С, включаючи в роботу 2 – 3 випарники, щоб при іонному струмі 5 – 8 А температура інструменту за 25 – 30 хв підвищилася до заданих 560 – 580 °С. Температуру зразків контролюють оптичним мікропірометром ВИМП – 015 з електронно – оптичним перетворювачем і інфрачервоним пірометром. Після цього випарники виключають і при тиску $2{,}0 \cdot 10^{-1}$ – $2{,}6 \cdot 10^{-1}$ Па здійснюють нанесення покриттів за наступного режиму: негативна напруга 200 – 400 В,

іонний струм при роботі трьох випарників ~ 12 – 15 А, час нанесення 50 – 70 хв. Потім призупиняють подачу реакційного газу – азоту, напругу і обертання пристрою, відкривають технологічну камеру і вигружають зразок з покриттям TiN.

2.4. Мікроструктурний аналіз

Дослідження мікроструктури та товщини поверхневих шарів досліджуваних зразків проводили на мікроскопі “МИМ-8” з приставкою Digital camera DCM 130. Для того, щоб здійснити мікроструктурний аналіз виготовляли мікрошліфи.

2.5. Мікрорентгеноструктурний та рентгеноспектральний аналізи

Фотографування поверхонь тертя зразків і відповідних мікрорентгеноспектральних спектрів виконано на растровому електронному мікроскопі РЭМ-106И. Обробка інтегрального мікрорентгенівського спектру для отримання атомного складу елементів у зразках здійснювалась за допомогою фірмового програмного забезпечення керуючого комп’ютера прибору РЭМ-106И.

Фазовий склад досліджуваних дифузійних покриттів на зразках виконували на рентгенівському дифрактометрі ДРОН УМ-1, принцип дії яких полягає у явищі дифракції рентгенівських променів, шляхом пошарового аналізу поверхні зразків в мідному $K_{\alpha 1}$ випромінюванні.

2.6. Дюрометричний аналіз

Дослідження з визначення мікротвердості покриттів виконували на мікротвердомірі ПМТ-3, при навантаженні – 50 - 100 г., в якому в якості

індентора використовується алмазна чотиригранна піраміда. Замір мікротвердості відбувався від краю поверхні покриття до основи згідно ГОСТ 9450—76 [124]. На основі отриманих даних визначали середнє значення мікротвердості.

Залишкові напруження у поверхневих шарах сталі Р6М5 з покриттями визначали на рентгенівському дифрактометрі ДРОН-3. Міцність зчеплення покриття з ІМ оцінювали методом алмазного індентування на твердомірі ТК-2М [125]: на зразку отримували лунку з відшаруванням покриття навколо неї за допомогою індентора, потім визначали коефіцієнт відшарування – співвідношення площ відшарування і лунки, висновком про міцність зчеплення покриття з основою є те, чим нижчий коефіцієнт відшарування тим вищою є міцність зчеплення. Стійкість покриття до тріщиноутворення оцінювали на твердомірі ТК-2М за коефіцієнтом стійкості до утворення тріщин – визначали як відношення площі відшарування покриття до площі, яку займають тріщини. Чим нижчий коефіцієнт тим вищою є стійкість покриття до утворення тріщин [125].

Визначення показників мікрокрихкості багатокомпонентних покриттів здійснювали відомим методом, використовували прилад ПМТ-3 з пристроєм MIKRON -gamma, внаслідок аналізу кривої "навантаження на інденторі - глибина проникнення індентора", яку одержують при реєстрації процесу втиснення алмазного індентору в сталь з покриттями [108, 126].

2.7. Розрахунки напружено-деформованого стану сталі Р6М5 після комбінованої обробки

Аналітичні розрахунки НДС, що виникає при терті розраховували за відомою методикою [127]. Після ДЛО та наступного азотування сталі Р6М5 формується структура – зміцнюючі ділянки з рівними круговими поперечними перерізами, які розташовані перпендикулярно поверхні тертя, а

простір між зміцнюючими ділянками заповнено матрицею, характеристики їх відрізняються (рис. 2.1).

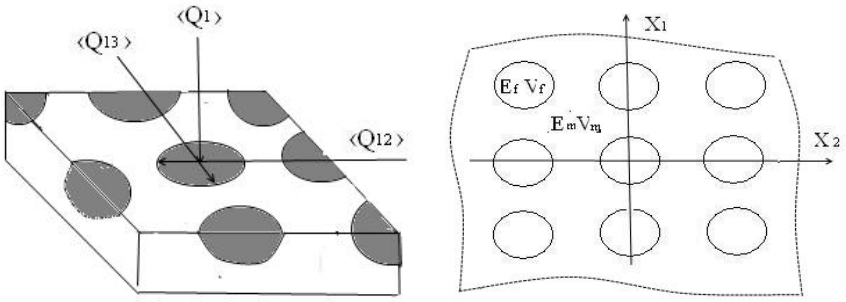


Рис. 2.1. Модель розподілу напружень поздовжнього стиску і зсуву

Сили нормального тиску, що діють на матеріал, який включає зміцнюючі ділянки викликають у ньому стан поздовжнього стиску *‹σ1›*, а сили тертя викликають у ньому стан поздовжнього зсуву, *‹σ13›*. У пружній області ці стани роздільні, що дозволяє вирішувати два самостійні завдання. У кожній точці включення або матриці виконуються рівняння рівноваги елементарного обсягу суцільного середовища [127]:

$$\partial\sigma_1\partial x_1 + \partial\sigma_1\partial x_2\partial\sigma_1\partial x_3 = 0$$

$$\partial\sigma_{12}\partial x_1 + \partial\sigma_2\partial x_2\partial\sigma_{23}\partial x_3 = 0$$

$$\partial\sigma_{13}\partial x_1 + \partial\sigma_{23}\partial x_2\partial\sigma_3\partial x_3 = 0 \qquad (2.1)$$

співвідношення пружності:

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E}\sigma_1 - \frac{\nu}{E}(\sigma_2 - \sigma_3); \gamma_{12} = G\sigma_{12};$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{E}\sigma_1 - \frac{1}{E}\sigma_2 - \frac{\nu}{E}\sigma_3; \gamma_{13} = G\sigma_{13};$$

$$\varepsilon_3 = -\frac{\nu}{E}(\sigma_1 + \sigma_2) + \frac{1}{E}\sigma_3; \gamma_{23} = G\sigma_{23}; \qquad (2.2)$$

співвідношення Коші:

$$\varepsilon_1 = \frac{\partial U}{\partial x_1}; \ \gamma_{12} = \frac{\partial U_1}{\partial x_2} + \frac{\partial U_2}{\partial x_1}$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\partial U}{\partial x_2}; \ \gamma_{13} = \frac{\partial U_3}{\partial x_1} + \frac{\partial U_1}{\partial x_3}$$

$$\varepsilon_3 = \frac{\partial U}{\partial x_1}\ ;\ \gamma_{23} = \frac{\partial U_2}{\partial x_3} + \frac{\partial U_3}{\partial x_3}\ ; \qquad (2.3)$$

де E – модуль Юнга; G – модуль зсуву; υ – коефіцієнт Пуассона;

σ_{ij} − напруги; ε_i − нормальні деформації; γ_{ij} − зсувні деформації; U_i − переміщення; X_i − координати.

Внаслідок дії поздовжнього стиску-розтягу стан сталі після комбінованої обробки можливо представити у вигляді двох найпростіших станах: стиску-розтягу без врахування взаємодії між зміцненими ділянками при дії невідомих постійних напруг у припущенні, що площина $x_1 = const$ не викривляється в процесі деформування; плоского деформованого стану для заданих зміщень на міжфазових границях за відсутності поздовжніх деформацій. Зміщення задаються такими, щоб різниця поперечних зсувів матриці й наповнювача забезпечувала безперервність сумарних зсувів для обох станів на поверхні контакту фаз [127].

При рішенні завдання при стиску-розтягу не взаємодіючих компонентів, напруження у поверхневих шарах сталі з зміцненими ділянками і без визначаються відповідно [127]:

$$\sigma_1 = \frac{E_f}{E_1}\langle\sigma_1\rangle,\ \sigma_1 = \frac{E_m}{E_1}\langle\sigma_1\rangle \qquad (2.4)$$

тут $E_1 = \xi E_f + \eta E_m + \dfrac{8G_m\eta(\upsilon_f - \upsilon_m)^2}{2 - \xi + (\chi_f - 1)G_m / G_f}, \qquad \chi = 3 - 4\upsilon$

Внаслідок поздовжнього стиску матриці із зміцненими ділянками через різницю коефіцієнта Пуассона зміцнених ділянок ν_f і матриці ν_m реалізується плоский НДС. Напруження визначається через дві розв'язні функції $\Phi(z)$ і $\Psi(z)$ [127]:

$$(\sigma_r - i\sigma_{rv}) = \phi(z) + \overline{\phi(z)} - 2e^{2iv}\left[z\phi'(z) + \psi(z)\right];$$

$$\sigma_2 + \sigma_3 = 2\left[\phi(z) + \overline{\phi(z)}\right];\quad \sigma_2 - \sigma_3 + 2i\sigma_{23} = 2\left[\overline{z}\phi'(z) + \psi(z)\right]; \qquad (2.5)$$

Рішення завдання про плоску деформацію наведеними методами дозволяє за аналогією з попереднім одержати в уточненому вигляді вирази для полів напруг у матриці [127]:

$$\sigma_2 = Q\{(\frac{1}{\rho^2}\cos 2\upsilon - \xi) + 9\frac{\xi^2}{\pi^2}[T\frac{1}{\rho^2}(\cos 2\upsilon - \frac{S-4\rho^2}{\rho^4}\cos 6\upsilon) +$$

$$+ \rho^2 \cos 2\upsilon]\} < \sigma_1 >$$

$$\sigma_3 = Q\{-(\frac{1}{\rho^2}\cos 2\upsilon + \xi) + 9\frac{\xi^2}{\pi^2}[T\frac{1}{\rho^2}(\cos 2\upsilon + \frac{S-4\rho^2}{\rho^4}\cos 6\upsilon) -$$

$$- \rho^2 \cos 2\upsilon]\} < \sigma_1 >$$

$$\sigma_{23} = Q\left[\frac{1}{\rho^2}\sin 2\upsilon - 9\frac{\xi^2}{\pi^2}\rho^2 \sin 2\upsilon + T\frac{5-4\rho^2}{\rho^4}\sin 6\upsilon\right]\langle\sigma_1\rangle;$$

$$\sigma_r = Q\left\{\left(\frac{1}{\rho^2} - \xi\right) + 9\left[T\frac{1}{\rho^4}\left(6 - 5\frac{1}{\rho^2}\right) + \rho^2\right]\cos 4\upsilon\frac{\xi^2}{\pi^2}\right\}\langle\sigma_1\rangle; \qquad (2.6)$$

де: $Q = \dfrac{1}{E}\dfrac{4G(\upsilon_m - \upsilon_f)}{2 - \xi + \chi_m\xi + \eta G_m / G_f(\chi_f - 1)}$;

$$T = \frac{1 - G_m / G_f}{\chi_m + G_m / G_f}.$$

Максимальні напруження в матриці будуть виникати в точках між її границею і зміцненими ділянками при дії середніх напружень поздовжнього стиску, де спостерігається максимальне зближення зміцнюючих ділянок із координатами $\rho = 1$, $\nu = 0, \pi$. Тоді (2.6) прийме вид [127]:

$$\sigma_r = Q\left\{1 - \xi + 3\frac{\chi_m + 1}{\chi_m + G_m / G_f}\left(3 + 10\frac{\xi^2}{\pi^2}\right)\frac{\xi^2}{\pi^2}\right\}; \qquad (2.7)$$

найбільший коефіцієнт концентрації напружень складе:

$$K_r = \frac{\sigma_1}{\langle\sigma_1\rangle} = Q\left\{1 - \xi + 3\frac{\chi_m + 1}{\chi_m + G_m / G_f}\left(3 + 10\frac{\xi^2}{\pi^2}\right)\frac{\xi^2}{\pi^2}\right\}; \qquad (2.8)$$

2.8. Визначення триботехнічних властивостей сталі Р6М5 після комбінованої обробки

Випробування на зносостійкість в умовах тертя ковзання проводили на машині СМЦ-2 за схемою “ролик-ролик“, методика випробування на якій стандартизована. При цьому один ролик обертався, а другий був нерухомим, що дозволило моделювати тертя ковзання при різних умовах. В якості матеріалу контртіла в усіх випадках застосовували сталь Р6М5, термооброблену до твердості 63...65 HRC. Швидкість ковзання становила V = 1-4 м/с, навантаження Р = 1-4 МПа, шлях тертя S = 50-200 м. Після випробувань зразки промивали спиртом, сушилися і зважувалися на електронних вагах AXIS з точністю до четвертого знаку після коми при температурі 20 °С. Коефіцієнт тертя визначали протягом перших 200 с тертя (в момент припрацювання) і підраховували середнє значення [128].

Вибробування на зносостійкість до абразивного зношування проводили на машині тертя (рис. 2.2) відповідно до ГОСТ 23.208-79, який використовується для порівняльної оцінки зносостійкості матеріалів і покриттів при терті в умовах нежорстко закріплених абразивних частинок [129, 130, 131].

Рис. 2.2. Загальний вид машини тертя для випробування на абразивну зносостійкість в умовах не жорстко закріплених частинок [130, 131]

Схему установкм представлено на рис. 2.3. Метод полягає у наступному [130, 131]: зразок зі сталі Р6М5 після комбінованої обробки, розміром 30×30 мм

і товщиною 4-5 мм 2, прижимався резиновим роликом з діаметром 50 мм. Коли ролик крутиться, то в зону контакту подаються тверді абразивні частинкі 7 із бункера 5. Зусилля прижиму регулювалось за допомогою ричага 9 і навантаження 44,1Н. В якості абразиву використовували кварцевий пісок (SiO_2) та та карбід бор зернитістю 150-500 мкм. Перед та після випробувань зразки промивали спиртом, висушували і зважували.

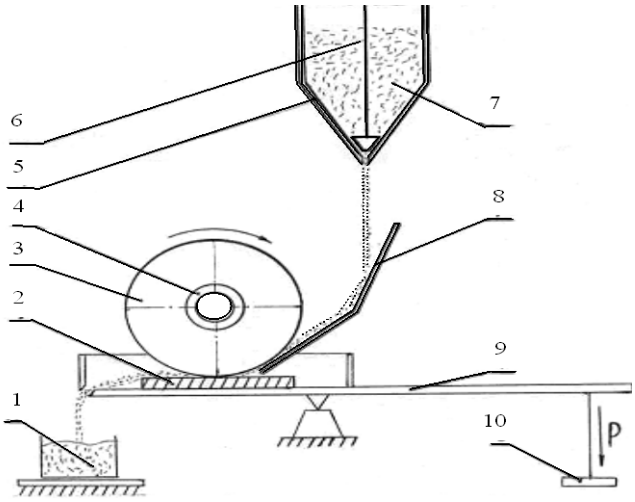


Рис. 2.3. Схема машини тертя [130, 131]: 1 – бункер для збирання відпрацьованого абразиву; 2 – зразок матеріалу, що досліджується; 3 – циліндр, що обертається; 4 – втулка для цилиндру; 5 – бункер для вільного абразиву; 6 – важіль для регулювання швидкості подачи абразиву; 7 – вільний абразив; 8 – лоток для подачи абразиву; 9 – важіль для регулювання зусиль притискування циліндру до тертьової поверхні з абразивом; 10 – навантаження важіля силою P_0.

2.9. Визначення стійкості інструменту після комбінованої обробки

Випробування з визначення стійкості РІ зі сталі Р6М5 у вихідному стані та з комбінованими покриттями проводили на токарно – гвинторізальному верстаті моделі 1Е61М при точінні заготівок із сталі 30ХГСА та ХВГ з охолодженням (5 % – ний розчин емульсолу «Укрінол»).

Критерієм зносу 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.

2.10. Математичне моделювання формування зносостійких іонно-плазмових багатошарових градієнтних покриттів

Внаслідок недостатньо відомої кількості відомостей про механізм формування зносостійких БГП, при побудові математичної моделі проводили обмеження схематичного представлення об'єкту дослідження у вигляді "чорного ящика" [132-134], на який впливають такі групи факторів [135, 136]:

$X=(X_1, X_2, X_3...X_к)$ – контрольовані фактори, які можуть цілеспрямовано змінюватися в ході дослідження; $U=(U_1, U_2, U_3...U_m)$ – контрольовані фактори, які не можуть цілеспрямовано змінюватися в ході експериментальних досліджень; $Z=(Z_1, Z_2, Z_3...Z_n)$ – неконтрольовані і не управляємі фактори; $Y=(Y_1, Y_2, Y_3...Y_p)$ − вихідні змінні (критерії оптимізації).

Задачею дослідження є визначення значень $X_i = \text{var}$, при яких критерій оптимізації об'єкту Y досягав би оптимальної величини при фіксованих параметрах $U_j = const$ і $Z_r = const$, тобто в оптимізації функції $Y=f_{opt}(X_i=var; U_j=const; Z_r=const)$ при $X_{iH} \le X_i \le X_{iB}$ [137, 138].

Функція відгуку $Y=f(X_1, X_2, X_3,\ldots,X_k)$ є статистичною математичною моделлю об'єкту, представлення якої обмежували поліномом [139]:

$$Y^* = b_0 + \sum_{i=1}^{k} b_i x_i + \sum_{i=1}^{k} b_{ii} x_i^{\,2} + \sum_{i<1}^{k} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i<jj<l}^{k} b_{ijl} x_i x_j x_l \,, \qquad (2.9)$$

де Y^* – розрахункове значення параметру оптимізації; $b_0, b_i, b_{ii}, b_{ij}, b_{jj}$ – вибіркові коефіцієнти, отримані методами регресійного аналізу результатів експерименту.

Здійснення математичного моделювання відбувалось за такими етапами [140, 141]: формалізація задачі, 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.

Спочатку було обрано залежні (критерії оптимізації) та незалежні (фактори) змінні, визначено склад контрольованих некерованих і керованих змінних, рівнів варіювання для керованих і рівнів фіксації для некерованих змінних [142]. Кількість незалежних змінних дорівнювала 5, отже, згідно з рекомендаціями [143], необхідна кількість дослідів становила 16.

Генерацію плану експерименту було здійснено на основі $ЛП_\tau$ – чисел [144, 145], тому що такі плани мають ряд переваг [141]: при "випаданні" одного з експериментів властивості плану погіршуються в межах, що дозволяють його використовувати; ці плани одночасно є планами пошуку оптимальних умов та дозволяють глибше аналізувати досліджувану область; $ЛП_\tau$ - плани можна використовуватися послідовно — витрати можуть збільшуватися поступово, поєднуючи попередні результати з наступними. План експерименту будували за допомогою ППП ПРІАМ (пакет прикладних програм "Планування, регресія й аналіз моделей) [146, 147]. Отриманий план являв собою матрицю, кожний рядок якої містив кодовані значення (десятковий дріб в інтервалі від 0 до 1) незалежних змінних для кожного рівня.

Одержана матриця переводилась з кодованих змінних до натуральних за формулою:

$$X_{ij} = X_{\min j} + Q_{ij} \times (X_{\max j} - X_{\min j}), \qquad (2.10)$$

де X_{ij} – натуральне значення *j*-го фактору в *i*-му досліді; Q_{ij} – кодоване значення *j*-го фактору для *i*-го досліду; $X_{\max j}$ ($X_{\min j}$)– максимальне (мінімальне) значення *j*-го фактору.

Експеримент та попередній аналіз його результатів проводився у відповідності до згенерованої робочої матриці: результати повторних дослідів, проведених у номінально однакових умовах, перевіряли на статистичну

відтворюваність за G - критерієм Кохрена :

$$G = \frac{S_{\max}^{\ 2}}{\sum_{i=1}^{N} S_i^{\ 2}}, \qquad (2.11)$$

де $S_{\max}^{\ 2}$ – максимальна з дисперсій; $S_i^{\ 2}$ – дисперсії, що розраховані в кожному експерименті за повторним (дублюючим) дослідом за формулою: $S_i^{\ 2} = \frac{\sum_{j=1}^{n}(Y_{ij} - \bar{Y}_i)^2}{n-1}$, ($n$ – кількість паралельних (дублюючих) дослідів; Y_{ij} – значення відгуку в i-му експерименті при j-му повторенні; $\bar{Y}_i$ – середнє значення відгуку за повторними дослідами в i-му експерименті).

Порівняння всіх отриманих результатів здійснювали з табличними, і якщо $G_{роз} < G_{таб_{\alpha,n-1,N}}$, то гіпотеза про однорідність приймалася і дисперсія відтворюваності розраховувалася за формулою: $S_{відтвор.}^{\ 2} = \frac{\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{n}(Y_{ij} - \bar{Y}_i)^2}{(n-1)N}$.

Спочатку перед побудовою моделі за допомогою F-критерію Фішера перевіряли належність до однієї генеральної сукупності дисперсії відносно загального середнього та дисперсії відтворюваності: $F^{\,роз.} = \frac{S_{відтвор.}^{\ 2}}{S^2} < F^{\,табл.}_{\alpha,N(n-1),N-1}$, $S^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N}(\bar{Y}_i - \bar{\bar{Y}})^2}{N-1}$, де $\bar{\bar{Y}}$ – загальне середнє (середнє всіх середніх за стовпцем).

Далі будували (за результатами експериментальних даних) лінійну за параметрами регресійну модель (5.1): з початкової безлічі регресорів, що включають всі головні ефекти і всі взаємодії заданих типів, обирали деяку кількість, яка повинна включати пошукову структуру моделі, та за допомогою процедури покрокового регресійного аналізу визначали кінцеву структуру моделі. Розрахунок коефіцієнтів математичної моделі проводили за формулами:

$$b_0 = \frac{\sum_{u=1}^{N} \bar{Y}_u}{n}; \quad b_i = \frac{\sum_{u=1}^{N} Y_u \bar{X}_{iu}}{n}; \quad b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^{N} X_{iu} X_{ju} \bar{Y}_u}{n}. \qquad (2.12…2.14)$$

За критерієм Ст'юдента виконували перевірку значущості коефіцієнтів регресії: знаходили дисперсію похибки визначення коефіцієнту b_i $S^2_{b_s} = \frac{1}{N \cdot n} S_{відтвор.}^{\ 2}$ (де N – кількість дослідів; n – кількість паралельних (дублюючих) дослідів; $S_{відтвор.}^{\ 2}$ – дисперсія відтворюваності; далі визначали відношення абсолютного значення коефіцієнту регресії b_i до середнього квадратичного відхилення похибки його визначення: $t_{роз.} = \frac{|b_i|}{S_{b_i}}$) та табличне значення критерію $t_{табл.}$ при заданому числі ступенів свободи $f = N \cdot (n-1)$ та обраному рівні значущості α = 0,05. Якщо $t_{роз.} \geq t_{табл.}$, то коефіцієнт b_i вважали значущим, при $t_{роз.} < t_{табл.}$ коефіцієнт не включали до рівняння регресії.

Для можливості використання моделі для практичних цілей здійснювали перевірку її адекватності, інформативності і стійкості. За критерієм Фішера перевіряли адекватність [139, 148]: розраховували дисперсію адекватності $S_{àä}^{\ 2} = \frac{n}{N-l} \sum_{i=1}^{N} (\bar{Y}_i - \hat{Y}_i)^2$ (де $\hat{Y}_i$ – значення функції відгуку, що розраховане для i-го досліду за моделлю; l – кількість значущих коефіцієнтів у рівнянні регресії), обчислювали значення F-критерію Фішера $F_{роз.} = \frac{S_{ад}^{\ 2}}{S^2}$ та порівнювали його з табличним $F_{табл}$ (при визначених ступенях свободи чисельника $f_1 = N - l$, знаменника $f_2 = N(n-1)$ й рівні значимості α = 0,05). Якщо $F_{роз} \leq F_{табл}$, то з обраною довірчою ймовірністю вважали, що модель адекватно описує процес, що досліджувався.

Оцінку інформативності моделі здійснювали за величиною множинного коефіцієнта кореляції R (коефіцієнту кореляції між експериментальними значеннями відгуків й значеннями відгуків, що розраховані за моделлю), величина якого для активного експерименту повинна бути не менше 0,96...0,97)

[143]. Величину R^2 обчислювали за формулою: $R^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N} (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{\sum_{i=1}^{N} (\bar{Y}_i - \bar{Y})^2}$.

Перевірка значимості коефіцієнту множинної кореляції за критерієм Фішера є достатньою умовою: $F_R = \frac{S_R^{\ 2}}{S_{зал.}^{\ 2}} > F_{\alpha, V_R, V_{зал}}$, де V_R, $V_{зал}$ – ступіні свободи для дисперсії, що пояснюється моделлю, та залишкової дисперсії відповідно.

За умови виконання даної нерівності, модель із заданим рівнем значимості є інформативною. Для кількісної оцінки рівня інформативності моделі також використовували критерій Бокса-Веца. Хороша модель повинна мати параметр γ (значення γ визначається з наступного рівняння $F_0 \cong (1+\gamma) F_{\alpha, V_0, V_{зал}}$, де $V_0 = \frac{V_R (1+\gamma)^2}{1+2\gamma^2}$) не нижче, ніж 2...3 [149].

Далі розглядали таблицю мультиколінеарності для перевірки стійкості [149]. Структура рівняння регресії вважалася стійкою, якщо максимальний коефіцієнт парної кореляції між регресорами не перевищував за абсолютною величиною 0,3...0,4, а коефіцієнт парної кореляції з відгуком за абсолютною величиною був істотно більшим, ніж максимальний коефіцієнт кореляції з іншим регресором.

Для отриманих за результатами експерименту моделей виконували багатокритеріальну оптимізацію з використанням компромісу за Парето, який полягає в пошуку таких умов функціонування системи, за якими узагальнений критерій Y її оптимальності досягає екстремального значення: $\mathrm{Y}[x_1, x_2, ..., x_k] = \mathrm{Y}[y_1 = \min, y_2 = \max, ..., y_k = \min] = opt$ [150].

За допомогою методу експертних оцінок проводилося визначення вагових коефіцієнтів і рангів критеріїв оптимізації [143, 151]. Висновки експертів перевірялися на предмет їх узгодженості за допомогою коефіцієнта конкордації Кендала [143, 151]:

$$W = \frac{12}{m^2 \left(n^3 - n\right)} \sum_{j=1}^{n} \left(\sum_{i=1}^{m} \left(R_{ij} - \frac{n+1}{2} \right) \right)^2, \qquad (2.15)$$

де n – кількість параметрів (об'єктів), що оцінюють експерти; m – кількість експертів; R_{ij} – ранг j-го об'єкта (параметра), призначений йому i-м експертом.

Вибіркове значення коефіцієнту конкордації на статистичну значущість перевіряли за величиною $\chi^2_{\alpha;n-1}$ (α-процентної точки χ^2-розподілу зі ступенями вільності (n – 1)), яку брали з таблиці [152]. Наближене значення $\chi^2_{\alpha;n-1}$-роподіленої величини дорівнює $m(n-1)W$. При виконанні умови $m(n-1)W > \chi^2_{\alpha;n-1}$ гіпотеза про відсутність рангового множинного зв'язку між оцінками параметрів експертами відкидалася.

Проведення оптимізації здійснювали методом випадкового пошуку на основі $ЛП_\tau$ - рівномірно розподілених випадкових точок [144, 153], тому що: даний метод дозволяє знайти глобальний екстремум, а не локальний, як усі інші; із зростанням числа ітерацій метод сходиться, що не гарантовано в інших; ефективність методу не залежить від форми поверхні відгуку; ефективність випадкового пошуку істотно залежить від "рівномірності" розподілу випадкових точок у багатовимірному одиничному кубі (у фактичному просторі), а найкращими для зондування цього простору серед відомих зараз рівномірно розподілених послідовностей є $ЛП_\tau$-послідовності [143, 144].

Оптимальну точку у факторному просторі знаходили за методикою [143]. Узагальнений критерій оптимізації $y_{узаг}$ розраховували за формулою:

$$y_{узаг_r} = \sqrt{\sum_{j=1}^{m} \left[1 - D_{jr}\right]^2 \cdot W_j^2}\,, \qquad (2.16)$$

де $y_{узаг}$ – значення узагальненої цільової функції для r-го досліду експерименту, яка у випадку пошуку оптимальних умов прагне до 0 $\left(y_{узаг} \to 0\right)$ і є оцінкою близькості цієї точки до гіпотетичного оптимального значення, що дорівнює 1;

W_j – вага j-го критерію оптимізації; m – кількість критеріїв оптимізації;

D_{jr} – зведене до інтервалу 0...1 значення j-го критерію оптимізації у r-му досліді експерименту; коли метою j-го критерію оптимізації є МІНІМУМ

обчислюють за формулою $D_{jr} = 1 + \frac{y_{j\max} - y_{jr}}{y_{j\max} - y_{j\min}}$, де $y_{j\max}$ і $y_{j\min}$ – відповідно максимальне та мінімальне значення j-го критерію оптимізації серед N дослідів (пробних точок). Точка факторного простору, якій відповідало найменше значення узагальненого критерію оптимізації (якому відповідає максимальне значення $y_{ефект}$ ($y_{ефект} = 1 - y_{узаг}$)), була оптимальною, а відповідний рядок з матриці натуральних значень − рядком з оптимальними значеннями параметрів. Для визначення найкращої точки використовували функцію ППП ПРІАМ “Багатопараметрична оптимізація” [154]. Навколо найкращої отриманої точки проводили перевірочний експеримент (3...4 досліди) [143].

Здійснення математичного моделювання за даною методикою дозволило позбавитися основних недоліків класичної теорії планування експерименту та регресійного аналізу – планування та обробки моделей заздалегідь заданої структури та обов’язкового використання стандартної області планування.

2.11. Висновки до розділу

1. При аналізі літературних даних, визначено алгоритм дослідження підвищення триботехнічних властивостей швидкорізальної сталі Р6М5 комбінованими методами нанесення зносостійких покриттів.

2. Визначено та описано методики зміцнення поверхневих шарів швидкорізальної сталі Р6М5 комбінованими методами нанесення зносостійких покриттів.

3. Визначено та описано методики проведення досліджень механічних властивостей, структурно-фазового та хімічного складу зміцнених поверхневих шарів швидкорізальної сталі Р6М5 та триботехнічних властивостей.

4. Результати досліджень буде можливо використовувати як базу для створення технологічних основ процесу формування зносостійких покриттів на РІ з підвищеною зносостійкість і працездатністю, що дозволить зменшити витрати дефіцитних та дорогих матеріалів з яких виготовляється РІ, знизити витрати трудових, економічних та енергетичних ресурсів.

РОЗДІЛ 3
ФОРМУВАННЯ ЗНОСОСТІЙКИХ ДИСКРЕТНИХ ПОКРИТТІВ НА СТАЛІ Р6М5 ШЛЯХОМ АЗОТУВАННЯ ТА ЛАЗЕРНОЇ ОБРОБКИ

Оскільки в даній роботі дифузійне азотування є складовим комбінованих процесів в поєднанні з ЛО та з дифузійною металізацією (азотитанування та азотохромування) то першим етапом було здійснено азотування сталі Р6М5 та досліджено будову, склад і властивості поверхневого азотованого шару.

Азотування є найпоширенішим та ефективним методом підвищення експлуатаційних і триботехнічних властивостей сталей, яке надасть виробу високу поверхневу твердість, що не змінюється при нагріві до високих температур, високу зносостійкість, високу границю витривалості та хорошу шліфуємість [155].

Товщина азотованого шару на швидкорізальних сталях зменшується через вміст великої кількості легуючих елементів, але при цьому збільшується її твердість. Товщина азотованого шару з підвищенням температури підвищується, однак з підвищенням температури насичення твердість значно зменшується. Недоліком азотування є те, що при цьому процесі здійснюється нагрівання сталевих виробів до високих температур та тривала витримка при цих температурах, що є енергозатратним процесом, при цьому також погіршуються їх механічні властивості [155].

Зменшити час ХТО, тобто пришвидшити дифузію атомів різних елементів вглиб матеріалу і отримати ті ж параметри покриттів (їх товщину, мікротвердість та ін.) при менших температурах та витримках (при менших енергозатратах) або при стандартних режимах насичення отримати покриття більшої товщини і з кращими показниками фізико-механічних властивостей і зносостійкості, можна за рахунок збільшення дефектності кристалічної будови матеріалу, а саме збільшення густини дислокацій, подрібнення зерен і, відповідно, збільшення протяжності їх границь [155].

На теперішній час розроблено багато методів поєднання різних

технологічних процесів з азотуванням: азотування + гартування; ЛО + азотування; ЕІЛ + ППД, ЕІЛ + іонно-плазмове напилення, азотування + ППД; азотування + цементація та ін [29, 38, 90]. Науковий і практичний інтерес представляють дослідження впливу попередньої ЛО на подальшу ХТО, зокрема азотування та її впливу на фазовий склад, будову і фізико-механічні та триботехнічні властивості сталі Р6М5.

3.1. Азотування швидкорізальної сталі Р6М5

В результаті проведених аналізів встановлено, що в поверхневому шарі сталі Р6М5 після азотування формуються: $Fe_{2\text{-}3}(N,C)$, $Fe_4(N,C)$, $(Fe,W)_4(C,N))$, CrN. Азотований шар складається з дифузійного підшару – зони внутрішнього азотування (α) і нітридної поверхневої зони ($\varepsilon + \gamma' - \gamma'$) – зони сполук. Складова ε – фаза це твердий розчин на базі нітриду $Fe_{2\text{-}3}N$. Складова γ' – фаза це складова нітридної зони, що являє собою твердий розчин на базі нітриду Fe_4N. При азотуванні також утворюються леговані ε та γ'' фази.

Максимальна мікротвердість азотованого шару сталі Р6М5 становить 10,5 ГПа та плавно зменшується до значення сталі у вихідному стані. (рис. 3.1).

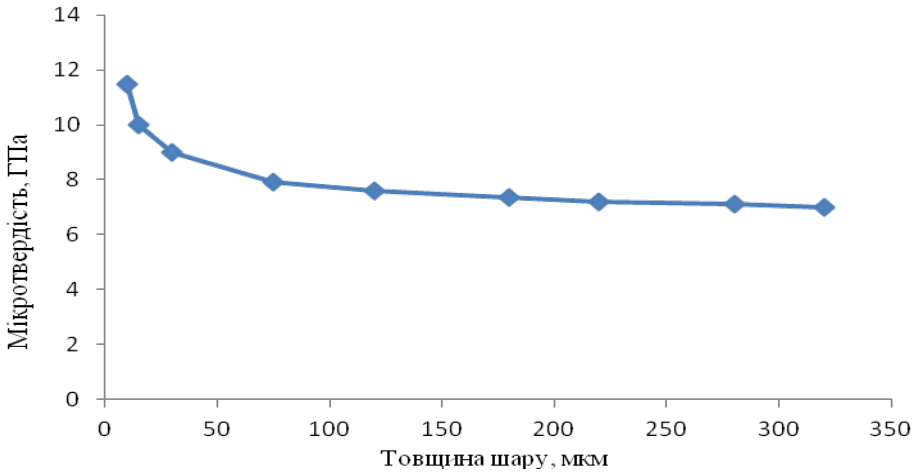


Рис. 3.1. Мікротвердість азотованого шару сталі Р6М5.

Висока мікротвердість поверхневого шару обумовлена, формуванням азотистого мартенситу і дисперсного нітриду (*ε* та *γ′* фаз*)*, а також високотвердих нітридів та карбонітридів легуючих елементів (Mo, W, Cr, V).

Азотований поверхневий шар, який характеризується такою структурою буде забезпечувати високі показники зносостійкість та експлуатаційні властивості РІ.

3.2. Комбінована лазеро-хіміко-термічна обробка сталі Р6М5

В роботі досліджувалась комбінована обробка поверхневих шарів сталі Р6М5, яка здійснювалась шляхом попередньої ЛО та наступного азотування в середовищі аміаку при температурах 540 ˚С [156, 157, 158]. На рис. 3.2 представлено вплив швидкості пересування лазерного променя під час ЛО на глибину азотованого шару.

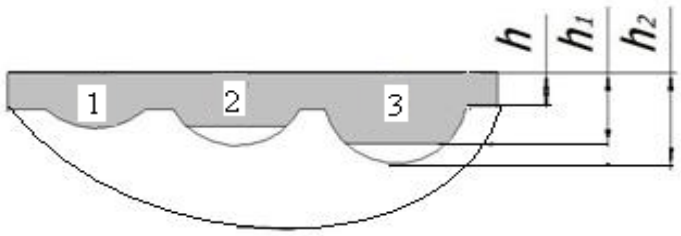


Рис. 3.2. Залежність глибини азотованого шару сталі Р6М5 від швидкості пересування лазерного променя: 1, 2, 3 – ділянки після ЛО, при швидкостях пересування лазерного променя – 0,5; 0,8; 1,2 м/хв. відповідно, h – глибина азотованого шару без ЛО, h_1 – глибина азотованого шару в зоні ЛО, h_2 – глибина ЛО.

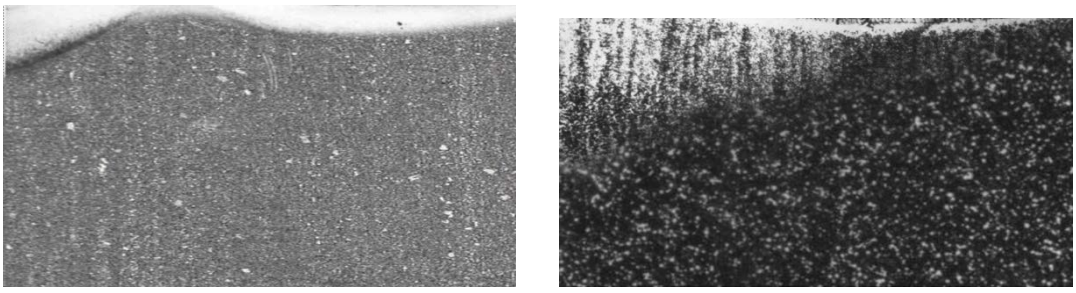
Зі збільшенням швидкості пересування лазерного променя спостерігається проникність атомів азоту на більшу глибину, проте на не максимальну глибину ЛО. При меншій швидкості пересування спостерігається проникнення атомів азоту на всю глибину, але діаметр зони лазерного впливу буде меншим.

При ЛО сталі Р6М5 можливо застосовувати безперервний чи імпульсний режими при яких забезпечується висока дисперсність мартенситу, також потрібно правильно підібрать параметри ЛО. Такий параметр, як потужність випромінювання на одиницю площі оброблюваної поверхні визначає характер термічних процесів, що відбуваються в оброблюваному матеріалі. При питомій потужності 10^3 – 10^4 Вт/см^2 відбувається нагрівання матеріалу, при 10^6 – 10^7 Вт/см^2 матеріал плавиться, а при потужності > 10^7 Вт/см^2 об′єкт руйнується шляхом випаровування [156, 158].

При ЛО температура поверхневого шару сталі Р6М5 перевищувала A_{C3}, але була нижчою за температуру плавлення. Навколо зони нагріву температура поступово знижувалася від температури плавлення до кімнатної. При ЛО місце де здійснюється опромінення лазером має форму кола з віссю лазерного імпульсу. Всередині цього кола відбувається повна фазова перекристалізація з наступним самогартуванням, а за його межами – лазерний відпуск, температура якого поступово знижується при віддаленні від указаного кола [156, 159].

При ЛО з перекриттям зон нагріву в місці перекриття відбувається повторна повна фазова перекристалізація з повторним самогартуванням, що не буде відрізняється від нової зони нагріву яку отримують при наступному впливі лазерного випромінювання. При цьому зміцнені ділянки чергуються з не зміцненими. Можливо, незміцнені ділянки можуть забезпечити релаксацію термічних і структурних напружень, що виникають у металі під дією імпульсних теплових навантажень та внаслідок самогартування [156, 159].

На рис. 3.3. представлені мікроструктури сталі Р6М5 після ЛО без перекриття і з перекриттям. Для проведення досліджень використовували зразки із сталі Р6М5 після стандартної термічної обробки: гартування від 1250 °С в мастило і триразового відпуску при 560 °С (HRC 63-65).



а *б*

Рис. 3.3. Мікроструктури сталі Р6М5 після ЛО: *а* – без перекриття; *б* – з перекриттям, Х 500.

Встановлено, що зміни в морфології зеренної структури сталі Р6М5 після ЛО і наступного азотування характеризуються інтенсивним подрібненням вихідної структури зерен, збільшенням протяжності їх границь, площі поверхні, при цьому підвищується активність та реакційна здатність, що призводить до прискорення дифузії атомів проникнення азоту в поверхневі шари сталі Р6М5 (рис. 3.4).

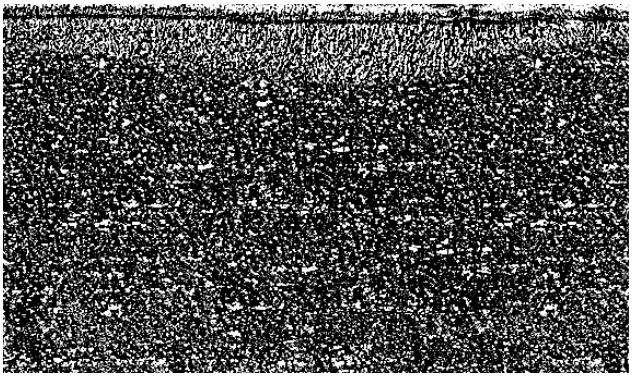


Рис. 3.4. Мікроструктура сталі Р6М5 після ЛО та азотування, х 500.

Внаслідок рентгеноструктурного аналізу встановлено, що у вихідному стані основною фазою матриці сталі Р6М5 є α – фаза. А також у фазовому складі сталі Р6М5 є частинки карбіду ванадію VC і карбіду вольфраму Fe_3W_3C. Аналіз отриманих даних показав, що зміна фазового складу, товщини і мікротвердості азотованого шару залежить від технологічних параметрів ЛО.

В поверхневих шарах сталі Р6М5 після азотування спостерігається утворення Fe_2O_3 та γ-Fe_2O_3, також присутні карбіди FeC, Fe_3C, Fe_2C та невелика кількість нітридів Fe_3N, Fe_2N, Fe_4N, ε-$Fe(Fe_{2\text{-}3}N)$, CrN. На сталі після

попередньої ЛО з наступним азотуванням спостерігається практично повна ідентичність по якісному фазовому складу, проте інтенсивність ліній нітридів Fe_2N, Fe_3N, Fe_4N, ε-Fe ($Fe_{2-3}N$), CrN зростає. Це свідчить про те, що зростає концентрація азоту з утворенням нітридів заліза. Встановлено, що без попередньої ЛО в нітридному шарі переважає ε – фаза, твердий розчин на базі нітриду $Fe_{2-3}N$, існує в широкому інтервалі концентрацій 4,5-11,0%N, але після ЛО основу нітридного шару складає γ'– фаза (кубічний нітрид Fe_4N).

Виходячи з вищесказаного можна сказати, що такі зміни структурного стану поверхневих шарів сталі Р6М5 дозволяють не тільки зменшити кількість крихкої і пористої ε – фази, підвищити концентрацію азоту в α і γ'– фазах, але і суттєво прискорити дифузійні процеси в порівнянні з традиційними методами.

Таким чином, ЛО поверхневих шарів сталі Р6М5 значно впливає на процес наступного азотування, при цьому попередньо сформований їх структурно-фазовий стан визначає якісний та кількісний характер змін в азотованому шарі.

Внаслідок дослідження мікротвердості встановлено, що на ділянках зразків без ЛО товщина азотованого шару склала 0,15 мм, а мікротвердість на поверхні – 10,5 ГПа. При ЛО товщина азотованого шару визначається товщиною шару після ЛО і досягає 0,32 мм з мікротвердістю 11,8 ГПа (рис.3.5). Після ЛО на поверхні зразків формується азотований шар високої твердості, що містить нітрид Fe_4N та дрібнодисперсний нітрид CrN [157-160].

В табл. 3.1 наведені значення товщин азотованого шару в залежності від часу азотування сталі Р6М5. Мікротвердість азотованого шару плавно знижується по мірі віддалення від поверхні в глибину до рівня вихідної сталі і складала 7,4 ГПа. На нашу думку зниження мікротвордості взалежності від підвищення швидкості пересування лазерного променя пов'язано із скороченням тривалості його дії та неповним завершенням фазового перетворення.

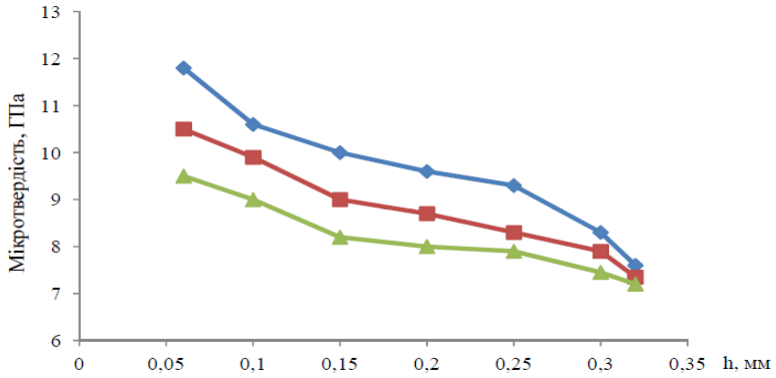


Рис. 3.5. Зміна мікротвердості по глибині азотованого шару в залежності від швидкості пересування лазерного променя: ♦ – 0,5 м/хв, ■ – 0,8 м/хв., ▲- 1,2 м/хв

Таблиця 3.1

Параметри азотованих шарів сталі Р6М5

Обробка	Товщина азотованого шару, мм	
	на ділянках з ЛО	на ділянках без ЛО
ЛО + азотування 1 год	0,25	0,02
ЛО + азотування 5 год	0,29	0,06
ЛО + азотування 10 год	0,32	0,15
азотування 10 год	-	0,15

При дослідженні кінетики азотування сталі Р6М5 після ЛО встановлено, що товщина азотованого шару майже однакова в разі витримування від 1 до 10 год. Так, за 1 год витримування вона становить 0,25 мм, за 5 год – 0,29 мм і за 10 год – 0,32 мм. Це свідчить про те, що ефект прискорювального впливу ЛО на дифузійну рухомість атомів азоту відбувається протягом першої години насичення.

3.3. Вплив дискретної лазерної обробки і наступного азотування на напружено-деформований стан сталі Р6М5 при терті.

З метою формування вимог до створення дискретно азотованих поверхонь були виконані аналітичні розрахунки НДС, що виникає при терті.

Визначалися залежності максимальної концентрації зсувних напружень (Kr) від вмісту зміцнюючих ділянок для сталі Р6М5 у вихідному стані (E_f = 2,1 · 10^5 МПа, G_f = 0,8 · 10^5 МПа, V_f = 0,27), після ДЛО (E_f = 2,2 · 10^5 МПа, G_f = 1,0 · 10^5 МПа, V_f = 0,2) і після ДЛО з наступним азотуванням (E_f = 2,5· 10^5 МПа, G_f = 1,2 · 10^5 МПа, V_f = 0,15) (рис. 3.6).

Видно, що наявність максимальної концентрації зсувних напружень спостерігається на границі контакту матриці з зміцнюючими ділянками, у місцях де відстань між зміцненими ділянками мінімальна. Початкове падіння інтенсивності дотичних напружень пов'язане зі збільшенням частки навантаження переданої на зміцнюючі ділянки.

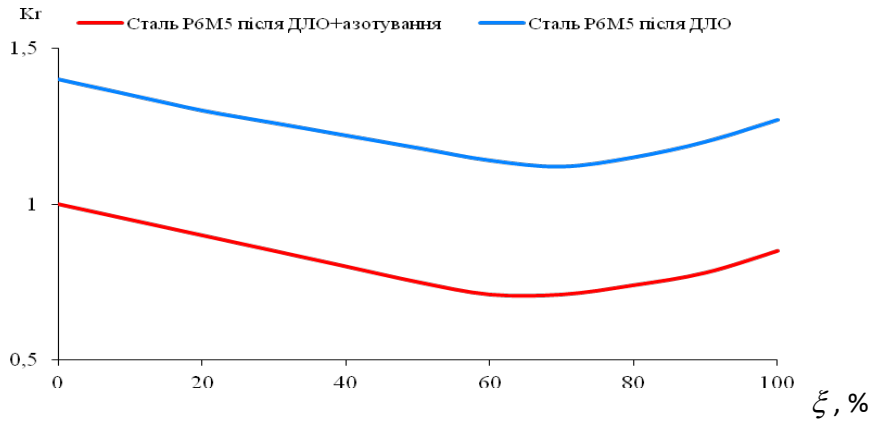


Рис. 3.6. Залежність максимальної концентрації напружень поздовжнього зсуву від вмісту зміцнюючих ділянок: *1* – сталь Р6М5 з ЛО; *2* – сталь Р6М5 з ЛО + азотування

Наведені результати свідчать про існування такої площі зміцнених ділянок (~ 60-75 %), за якої спостерігається мінімум інтенсивності локальних дотичних напружень у поверхневих шарах сталі. Таким чином, виходячи з ідеалізованих умов, розрахунковим шляхом отримані залежності концентрації напружень в поверхневому шарі від співвідношення механічних властивостей, співвідношення матриці та зміцнюючих ділянок. З аналізу цих залежностей, видно, що в умовах тертя слід надавати перевагу застосуванню 60 – 75 % зміцнюючих ділянок (ЛО з наступним азотуванням).

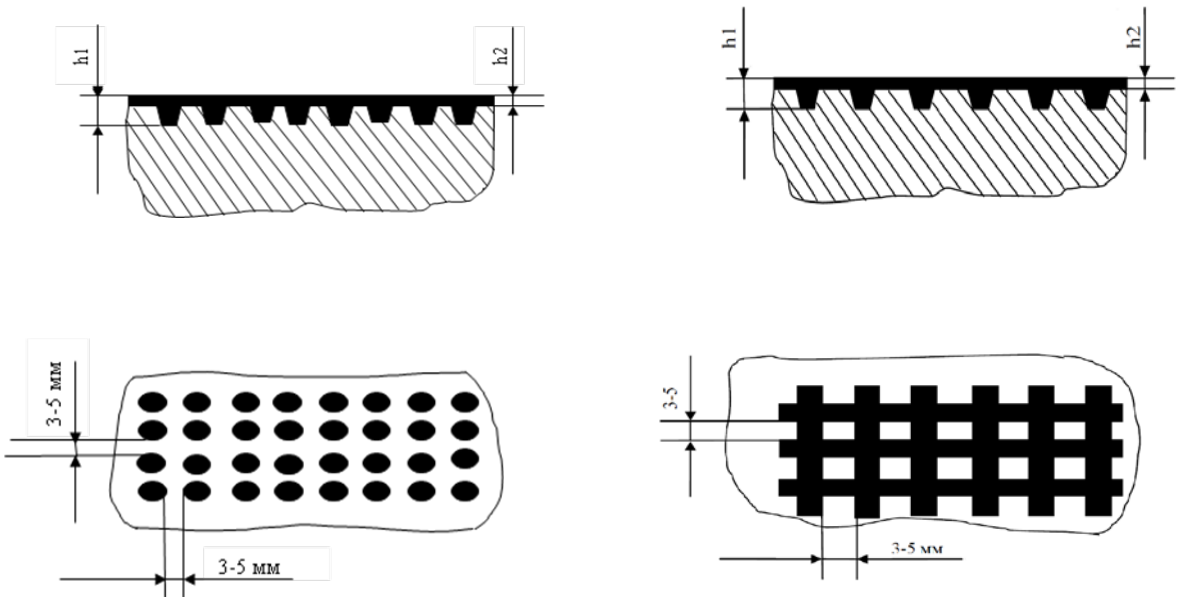
3.4. Формування властивостей дискретно азотованих покриттів на сталі Р6М5

Було поставлено такі основні задачі щодо зміцнення поверхневих шарів сталі Р6М5: розробити технологічний процес комбінованого поверхневого зміцнення сталі Р6М5 з підвищеними експлуатаційними властивостями в умовах жорсткого трибосилового навантаження; дослідити вплив схеми ДЛО зносостійкість та стійкість сталі Р6М5. Результати досліджень впливу конструктивних схем комбінованих покритттів на характеристики працездатності наведені в роботах [156-158, 161].

Нанесення комбінованих покриттів на РІ зі сталі Р6М5 включає ДЛО із площею обробки 70 % та наступне азотування [156-158]. Це дозволяє отримати більш товстіші, за рахунок попередньої ЛО азотовані шари і тонкі пластичні азотовані шари на ділянках без ЛО. Внаслідок цього формується комбіноване покриття з поєднанням пластичних азотованих шарів на не зміцненій попередньо ЛО поверхні та дискретно зміцнених з високою твердістю азотованих ділянок. Незміцнені ділянки екранують безпосередній контакт матеріалів трибоспряження і забезпечують утворення специфічних вторинних структур з високою стійкістю до температурно – силових впливів контактного фрикційного процесу при припрацюванні, а зміцнені ЛО ділянки забезпечують мінімальні напруження при терті та високу зносостійкість [156-158].

В роботі досліджувався вплив схем попередньої ДЛО на зносостійкість і стійкість сталі Р6М5 з азотованим покриттям. Для забезпечення високої зносостійкості, контактної втомної міцності, міцності покриття та мінімальні напруження при терті, за рахунок мінімізації НДС ДЛО здійснювали за сітчасто – стільниковою схемою з кроком 3-5 мм, така відстань 3–5 мм між ділянками обумовлена оптимальною площею обробки: 70-75 % від загальної площі зміцнюваної поверхні [156-158]. За рахунок попередньої ДЛО при наступному

азотуванні можливо отримати дискретні азотовані шари за сітчасто – стільниковою схемою зміцнення. Товсті, за рахунок попередньої ЛО дискретно азотовані шари і тонкі пластичні шари на ділянках без ЛО. Сітчасто – стільникова схема зміцнення поверхневого шару сталі Р6М5 з покриттям буде підвищувати її зносостійкість і контактну втомну міцність. Це зумовлено створенням такого НДС, при якому забезпечуються мінімальні напруження при терті, що встановлено аналітичними розрахунками та підтверджено експериментально [156-158]. На рис. 3.7 представлено схеми ДЛО острівного (*а*) і сітчасто – стільникового типів (*б*).



а б

Рис. 3.7. Схеми ДЛО [154]: а – острівного; б – сітчасто – стільникового типу

Товщина та мікротвердість азотованого шару на сталі Р6М5 становила: на ділянках з ЛО h_1 – 0,32 мм, 11,8 ГПа і на ділянках без ЛО h_2 – 0,012 мм, 9,3 ГПа.

3.5 Дослідження триботехнічних властивостей сталі Р6М5 після лазерної обробки та наступного азотування

Встановлено, що при зростанні мікротвердості до 10,8-11,5 ГПа велечина зносу і коефіцієнт тертя зменшуються. При подальшому підвищенні

мікротвердості вони майже незмінюються. Це відбувається внаслідок суттєвого впливу співвідношення пластичності і мікротвердості поверхневого шару (за рахунок фазового складу та структури) на триботехнічні властивості, зокрема на зносостійкість.

Триботехнічні випробування сталі Р6М5 у вихідному стані, після азотування 10 год. та дискретно-азотованої за різними схемами в умовах тертя ковзання проводили на машині тертя СМЦ-2. Результати випробувань наведені на рис. 3.8-3.11

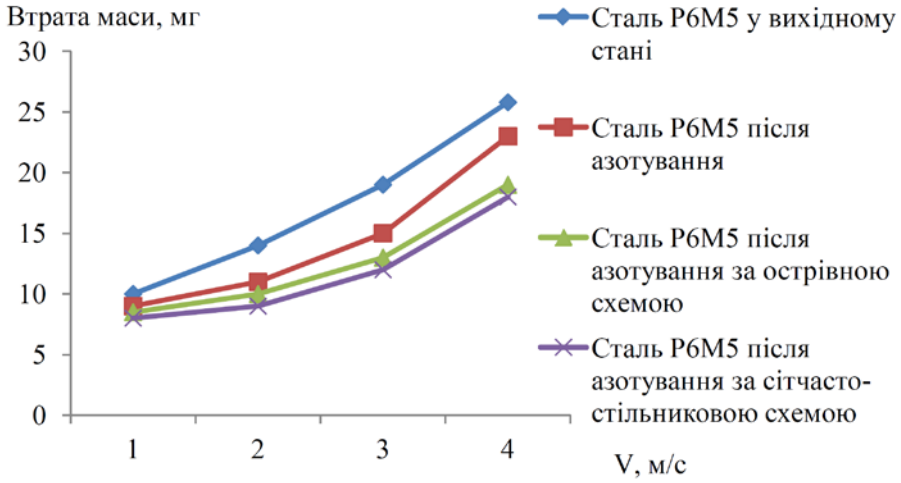


Рис. 3.8. Залежність велечини зносу від швидкості ковзання

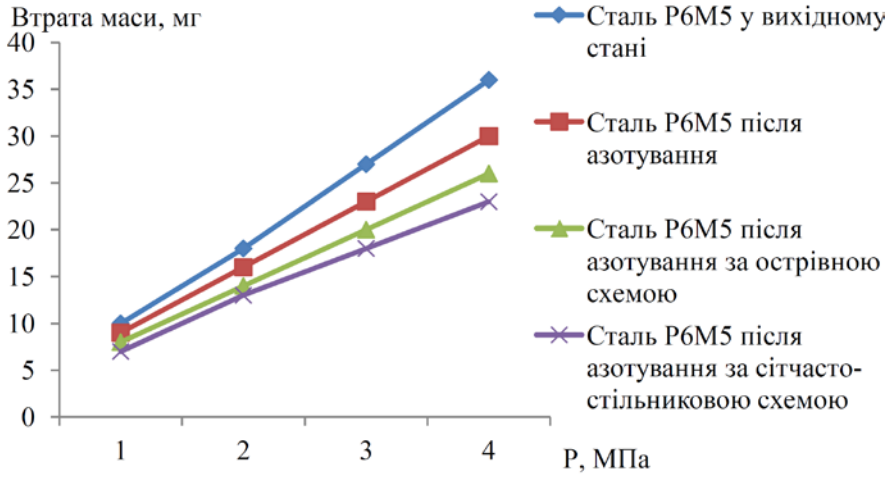


Рис. 3.9. Залежність велечини зносу від навантаження

Встановлено, що зносостійкість сталі після ДЛО за сітчасто-стільниковою схемою та наступного азотування є вищою порівняно з острівною схемою та з азотуванням, а характер зносу лінійний при високих режимах випробувань.

Випробування на зносостійкість сталі Р6М5 в умовах тертя ковзання без мащення показали, що зносостійкість сталі в даних умовах випробувань залежить, в більшій мірі, від швидкості ковзання та навантаження: при збільшенні швидкості ковзання збільшується знос майже в 1,5 рази, а при збільшенні навантаження знос збільшується в 2 рази.

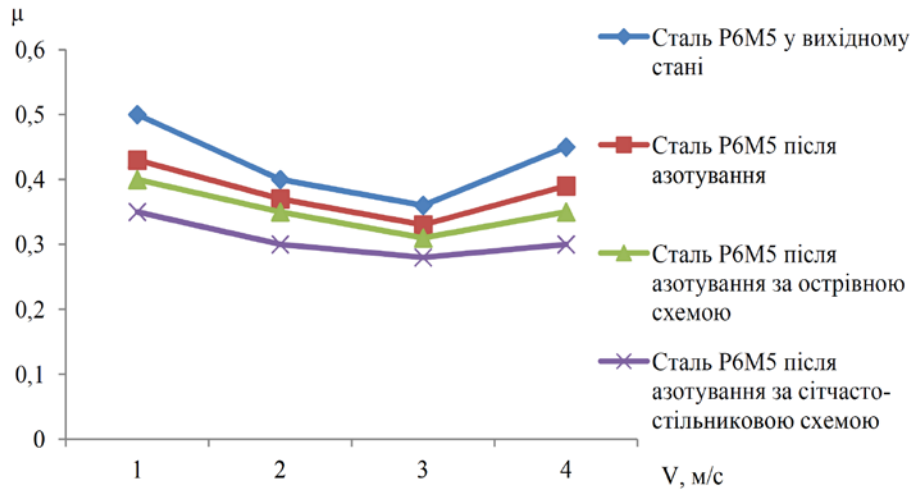


Рис. 3.10. Залежність величини коефіцієнта тертя від швидкості ковзання

На важчих режимах умовах випробувань коефіцієнт тертя змінюється більш плавно, що сприяє підвищенню зносостійкості РІ.

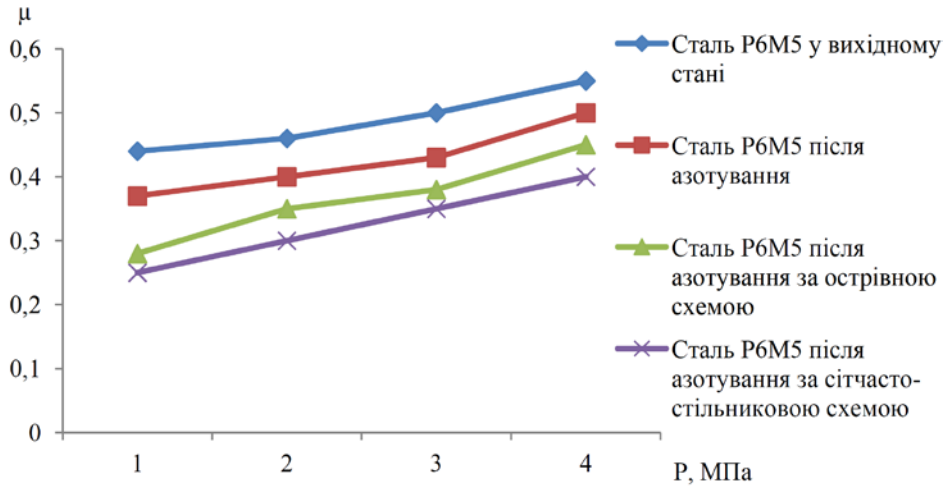
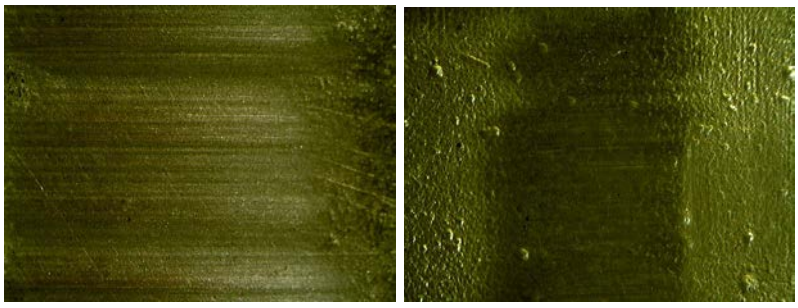


Рис. 3.11. Залежність величини коефіцієнта тертя від навантаження

Зносостійкість сталі Р6М5 після ДЛО з площею 70 % та наступного азотування збільшується у 1.5-1.7 разів, коефіцієнт тертя зменшується в 1,4 … 2,2 рази в порівнянні з азотуванням та сталлю у вихідному стані. Аналіз впливу

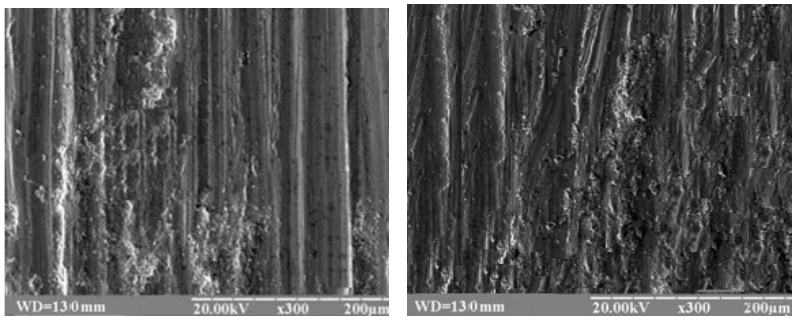
конструктивних варіантів покриттів дискретного типу та структурно-фазового складу на їх триботехнічні характеристики показав, що на режимах з високими навантаженнями та швидкостями, найменша величина зносу спостерігається для азотованих поверхонь із ЛО за схемою сітчасто-стільникового типу. Загальний вид поверхні тертя сталі Р6М5 після комбінованої обробки представлено на рис. 3.12.



а б

Рис. 3.12. Загальний вигляд поверхні тертя сталі Р6М5 після азотування (а) і після ЛО і наступного азотування (б)

В результаті проведених мікроскопічних досліджень поверхонь тертя сталі Р6М5 після ДЛО з наступним азотуванням встановлено, що спостерігається нерівномірність зношування поверхні (рис. 3.13). Це обумовлено анізотропією її структури внаслідок дії лазерного променя, яка впливає на міцність і характер руйнування.



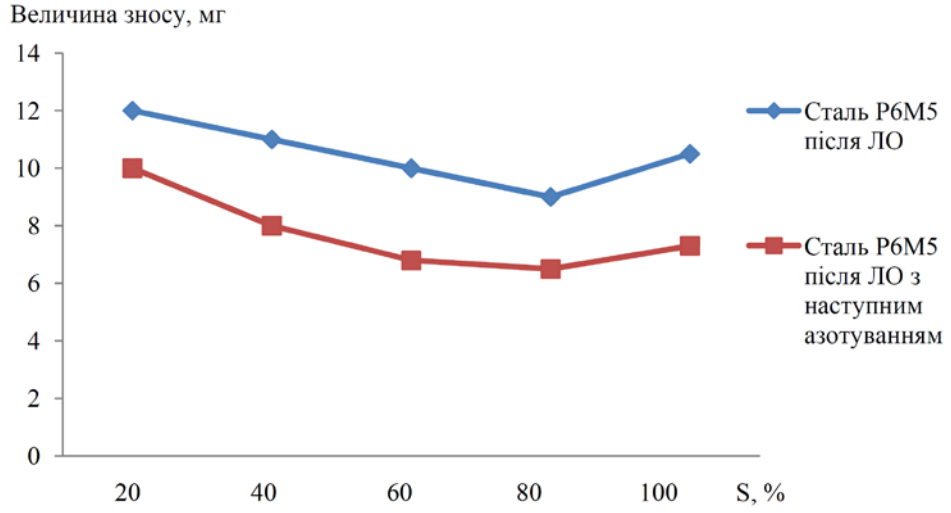
а б

Рис. 3.13. Поверхоні тертя сталі Р6М5 після азотування з попередньою ЛО за схемою острівного (а) та сітчасто-стільникового типів (б)

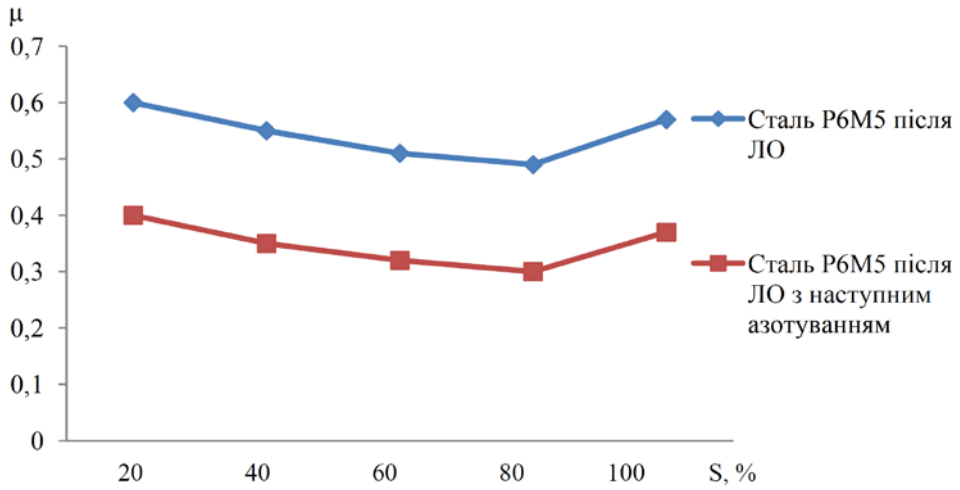
На нашу думку, високу зносостійкість сталі Р6М5 після ЛО і азотування можна пояснити тим, що в процесі тертя, за рахунок схем дискретних ділянок,

продукти тертя не виносяться із зони тертя, а накопичуються в межах дискретних проміжків, переміщуються в зоні тертя і, тим самим захищають поверхню від подальшого руйнування, а додаткове азотування сприяє підвищенню зносостійкості.

Внаслідок проведених експериментів з дослідження впливу площі ДЛО на сталі Р6М5 на її триботехнічні властивості було встановлено, що внасалідок азотування значно підвищується зносостійкість сталі, але характер залежності зносостійкості сталі Р6М5 після попередньої ДЛО і наступного азотування від площі обробки майже такий самий, як і після ДЛО (рис. 3.14).



а

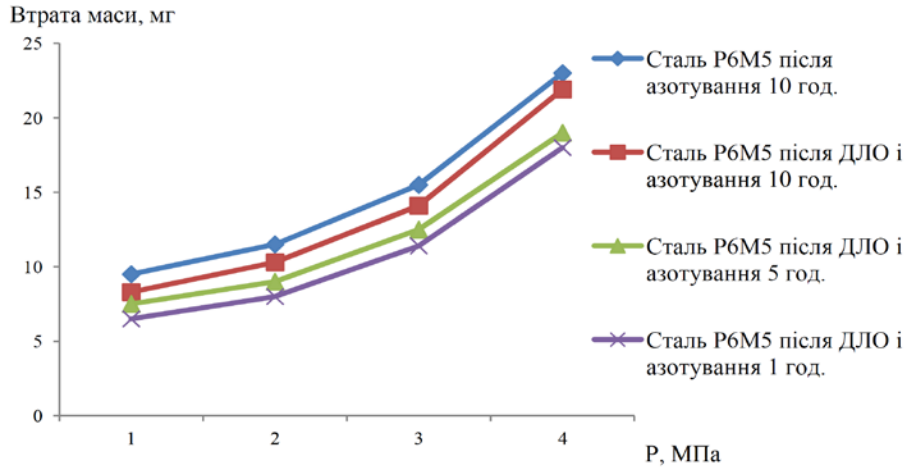


б

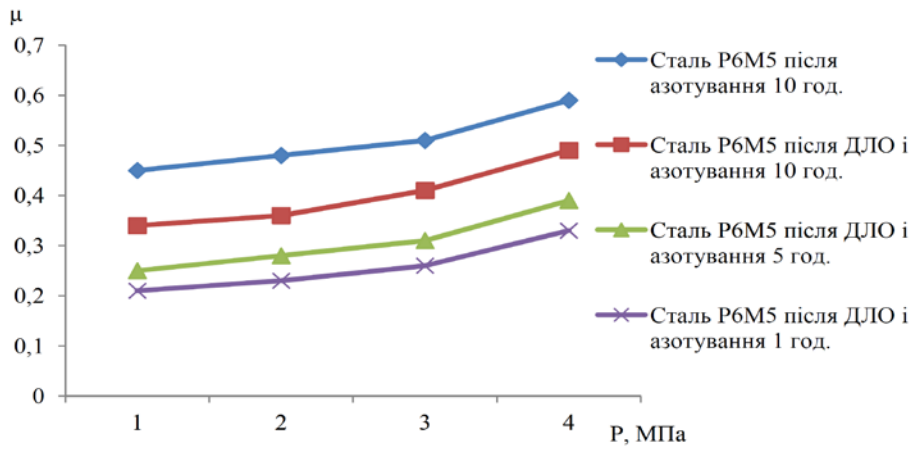
Рис. 3.14. Залежність велечини зносу (а) і коефіцієнта тертя (б) від площі обробленої лазером поверхні сталі (V = 1 м/с, Р = 1МПа)

Встановлено, що оптимальною площею ДЛО за рахунок якої відбувається підвищення зносостійкості і зменшення коефіцієнта тертя є площа, яка складає 60 – 80 % від загальної площі поверхні зразка. Як було встановлено раніше (рис. 3.6, 162, 163), ділянки з такою площею обробки характеризуються мінімальною концентрацією напружень, які виникають в умовах тертя. ДЛО більше як 80 % призводить до утворення майже суцільного шару і зносостійкість наближається до сталі з меншою площею обробки (рис. 3.14).

В роботі досліджувався вплив часу азотування на триботехнічні властивості сталі Р6М5 після ДЛО з наступним азотуванням. Залежність велечини зносу і коефіцієнту тертя від часу азотування і навантаження представлено на рис. 3.15.



а



б

Рис. 3.15. Залежність велечини зносу (а) і коефіцієнта тертя (б) від часу азотування і навантаження

Встановлено, що із збільшенням часу азотування з 1 до 10 год. величина зносу збільшується, проте на більш високих режимах випробувань вона різко зростає. Дані результати можна пояснити різницею між товщинами азотованого шару з ЛО та без ЛО (табл. 3.1). При азотуванні протягом 1 год. товщина азотованого шару на ділянках з ЛО відрізняється від товщини без ЛО – 0,25 і 0,02 мм відповідно. Проте, при азотуванні 10 год. товщини азотованого шару з ЛО і без складають 0,32 і 0,16 мм відповідно, через що відбувається утворення майже суцільного зміцненого шару.

Коефіцієнт тертя збішується майже лінійно, на нашу думку, це пояснюється утворенням вторинних структур (оксидних плівок), які полегшують тертя, проте, при важчих умовах тертя вони інтенсивніше руйнуються.

У досліджуваних зразків після тертя не спостерігається схоплювання, значних тріщин, поверхневих дефектів, викришування, морфологічна будова поверхонь тертя характеризується хвилястістю субмікрорельєфу через що можна сказати, що відбувається рухливість мікрооб'ємів поверхневого шару. Все це підтверджує достатню пластичність поверхневої оксидної плівки. Внаслідок впливу зсувних напружень при терті відбувається деформація цієї плівки без руйнування, що говорить про високу її міцність при досить високому запасі пластичності, що дозволяє досягати високої зносостійкості сталі Р6М5.

Результати досліджень свідчать, що за рахунок комбінованих покриттів (ЛО+азотування) на сталі Р6М5 не розвиваються процеси схоплення та адгезійного зношування, а також значного поширення тріщин, через що підвищується її зносостійкість в умовах тертя ковзання.

Після триботехнічних випробувань здійснювали дослідження структурно - фазового складу поверхневих шарів сталі Р6М5 після комбінованої обробки за допомогою мікроструктурного і мікрорентгеноспектрального аналізів.

Внаслідок проведеного дослідження хімічного складу поверхонь тертя було встановлено наявність кисню, який утворює оксиди (рис. 3.16). Висока

зносостійкість модифікованого поверхневого шару сталі Р6М5 обумовлена, тим, що він складається із азотистого мартенситу і дисперсних нітридів ε – фази та γ' – фазы, а також нітридів легуючих компонентів Mo, W, Cr, V.

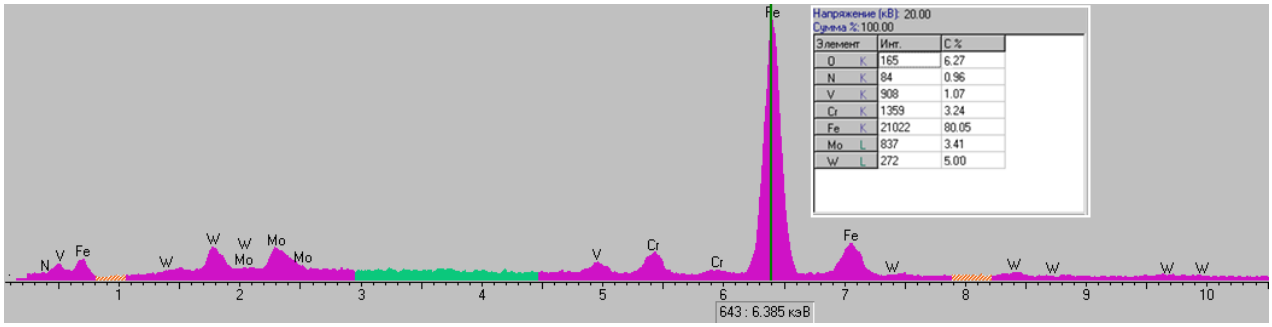


Рис. 3.16. Розподіл хімічних елементів на поверхні тертя сталі Р6М5 з комбінованим покриттям (ЛО+азотування) після випробувань в умовах тертя ковзання без мащення

Як відомо [27, 164], наявність в зоні контакту продуктів, які утворюються при терті, що самоорганізовуються і складаються з компонентів матеріалів пари тертя (продуктів реакції кисню і азоту з речовинами поверхні, у тому числі під впливом температури тертя), призводить до встановлення термодинамічної рівноваги, при якій виникає стійкий механохімічний процес, який супроводжує зношування поверхні тертя і характеризується безперервним формуванням і руйнуванням структур. Рушійною силою самоорганізації вторинних структур першого типу є зменшення вільної енергії, а головним механізмом - перехід до рідкого стану, завдяки нерівномірності напруженого стану і теплових полів, неоднорідності твердої фази і різної здатності поверхні до зволоження переміщення плівок вторинних структур першого типу відбувається однорідними фрагментами, які, переміщаючись по поверхні тертя, заповнюють западини, вигладжують нерівності, заліковують субмікродефекти [27, 164]. Відділення фрагментів відбувається шляхом зісковзування їх з поверхні тертя, знаходження на поверхні тертя вторинних структур покращує умови тертя, підвищує зносостійкість і абразивну стійкість сталі Р6М5 [27, 164].

Також, при терті сталі Р6М5 після ДЛО з наступним азотуванням можливе формування вторинних структур другого типу – трансформація матеріалу

відбувається за рахунок переведення основних деформаційних процесів в область пружних деформацій при дещо більшій твердості, частки зносу в цьому випадку є результатом відділення і подрібнення крихких плівок і мають довільну форму [27, 164]. Саме по'єднання рухливості мікрооб'ємів вторинних структур першого типу і високої твердості вторинних структур другого типу дозволяє досягати високої зносостійкості сталі Р6М5 з комбінованим покриттям.

Таким чином, в цілому, за рахунок обобки лазером та наступного азотуванням сталі Р6М5 можна досягти досить високий рівень зносостійкості і покращити процеси тертя та зношування і відповідно керувати її триботехнічними властивостями. Так як поверхневі азотовані шари, через наявність ε-фази, володіють підвищеною крихкістю тому зразки зі сталі Р6М5 після ЛО та наступного азотування випробували на контактну втомну міцність (табл.3.2) [156].

Таблиця 3.2

Контактна втомна міцність сталі Р6М5 зміцненої дискретно азотованими покриттями взалежності від схем попередньої ЛО

Схема ЛО	Контактна втомна міцність, кількість циклів до руйнування, $x10^3$
Острівного типу	0,52
Сітчасо-стільникового типу	0,64

Проведені випробування на контактну втомну міцність на машині тертя М6000 показали, що втомна міцність сталі з покриттям, нанесеним на поверхню, попередню оброблену лазером за стільниковою схемою, вища, ніж з покриттям, нанесеним на поверхню, попередньо оброблену за схемою острівного типу [156]. За рахунок твердих загартованих ділянок матриці сталі Р6М5, які обмежують її пластичну деформацію забезпечується висока втомна міцність.

На основі проведених досліджень встановлено, що за рахунок зміни структурно-фазового і хімічного складу поверхневих шарів сталі Р6М5 можливо досягти підвищення її зносостійкості при експлуатації за рахунок керування процесом формування вторинних структур інтенсивність окислювання яких

залежать від навантаження і швидкості тертя. Встановлено, що внаслідок ЛО і наступного азотуванням сталі Р6М5 основний механізм підвищення зносостійкості полягає у зміцненні поверхневих шарів та у зміні закономірностей деформації поверхневих шарів і зміні хімічних властивостей поверхні (формуються вторинні структури, що забезпечує підвищення зносостійкості сталі в конкретних умовах експлуатації).

На основі проведених електронно-мікроскопічних досліджень та рентгеноструктурного аналізу можна стверджувати, що висока зносостійкість азотованого шару швидкорізальної сталі Р6М5 пов'язана з утворенням азотистого мартенситу властивості, якого покращуються за рахунок ЛО і γ'-фази (Fe_4N), а також виділення дрібнозернистих включень зміцнюючої фази CrN.

Дослідження абразивної зносостійкості сталі Р6М5 після лазерної обробки та наступного азотування. Відомо, що одним з поширених видів зношування при МО є абразивний, в механізмі якого властивості поверхні грають важливу роль [12, 26, 165, 166]. Така форма зношування реалізується в процесі МО конструкційних матеріалів при попаданні в зону контакту «РІ – оброблюваний матеріал» твердих часток забруднення або продуктів руйнування покриття чи інструментального та оброблюваного матеріалів, які можуть мати високу твердість [12, 26, 165, 166]. Абразивну зносостійкість сталі Р6М5 взалежності від виду обробки і твердості абразивних часток наведено на рис. 3.17.

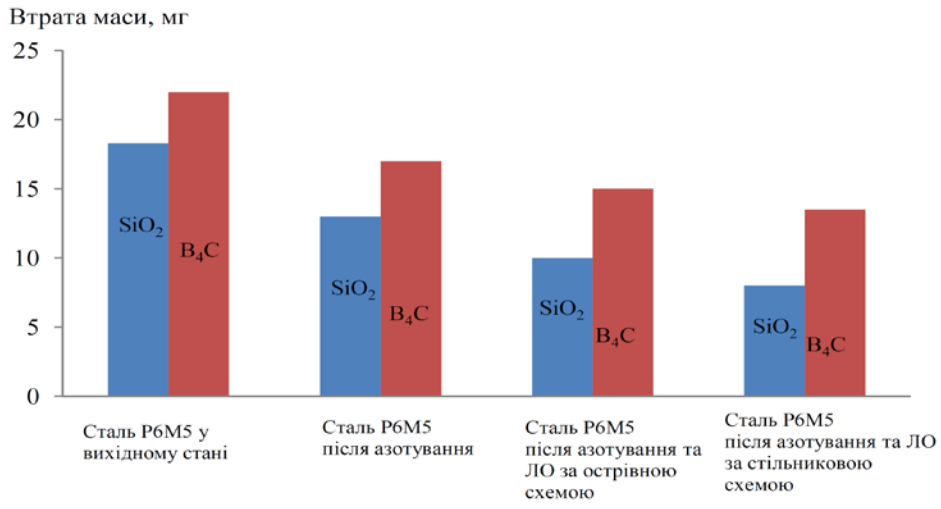


Рис. 3.17. Абразивна зносостійкість сталі Р6М5 з комбінованими покриттями взалежності від твердості абразиву

Дія абразивного зношування полягає у стиканні абразивні частинки із поверхневими шарами сталі по дотичній і пружному їх деформуванні. Залежно від структури та твердості абразивні частки можуть втискуватися в поверхневі шари, якщо вони мають більшу твердість і міцність достатню для втискування [12, 26, 165, 166].

Встановлено, що в результаті дії абразивних частинок відбувається проникнення її в поверхню сталі Р6М5 наступне дряпання та зрізання мікроскопічної стружки (рис. 3.18) особливістю абразивного зношування поверхневих шарів сталі Р6М5 після ЛО та наступного азотування є утворення вторинних структур (оксидних плівок) (рис. 3.19). Як вже зазначалось, за рахунок вторинних структур можливе підвищення абразивної зносостійкості.

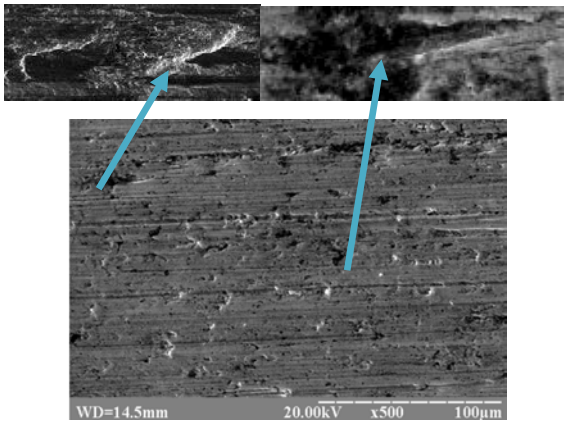


Рис. 3.18. Поверхня тертя сталі Р6М5 з комбінованим покриттям (ЛО + азотування) після випробувань на абразивну зносостійкість.

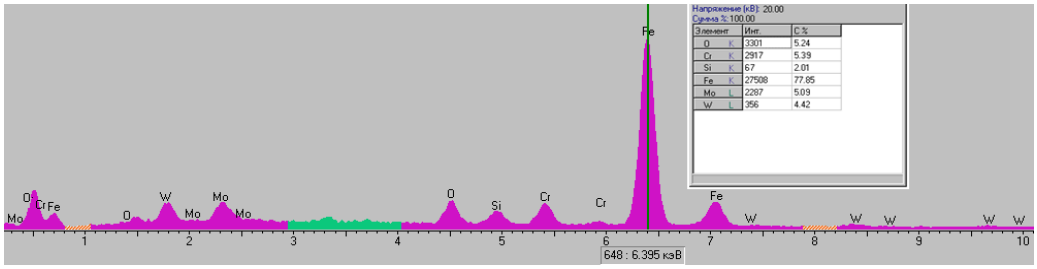


Рис. 3.19. Розподіл хімічних елементів на поверхні тертя сталі Р6М5 з комбінованим покриттям (ЛО + азотування) після дослідження абразивної зносостійкості

Дослідження стійкості РІ зі сталі Р6М5 після ЛО та наступного азотування при точінні сталі 30ХГСА. Для визначення стійкості РІ зі сталі

Р6М5 з комбінованим покриттям (ЛО + азотування) проводили випробування на токарно – гвинторізальному верстаті моделі 1Е61М при точінні заготівок зі сталі 30ХГСА.

В результаті проведеного дослідження встановлено, що стійкість пластин, оброблених ДЛО за схемою сітчасто-стільникового типу вища, ніж стійкість пластин, оброблених за схемою острівного типу в 1.7 рази, в порівнянні з азотованою сталлю у 2.3 рази, а у порівнянні зі сталлю у вихідному стані у 3.6 раз (рис. 3.20).

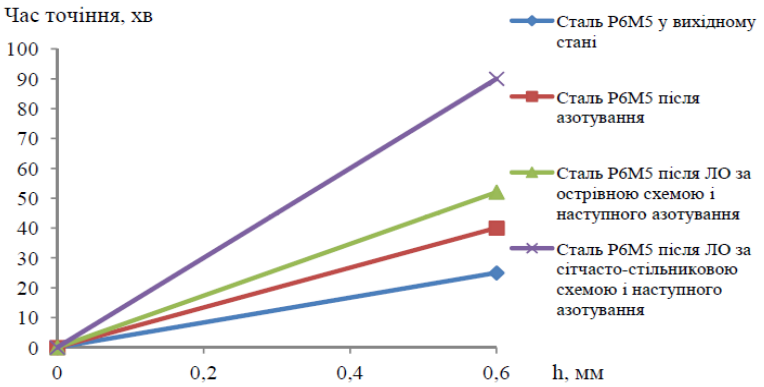
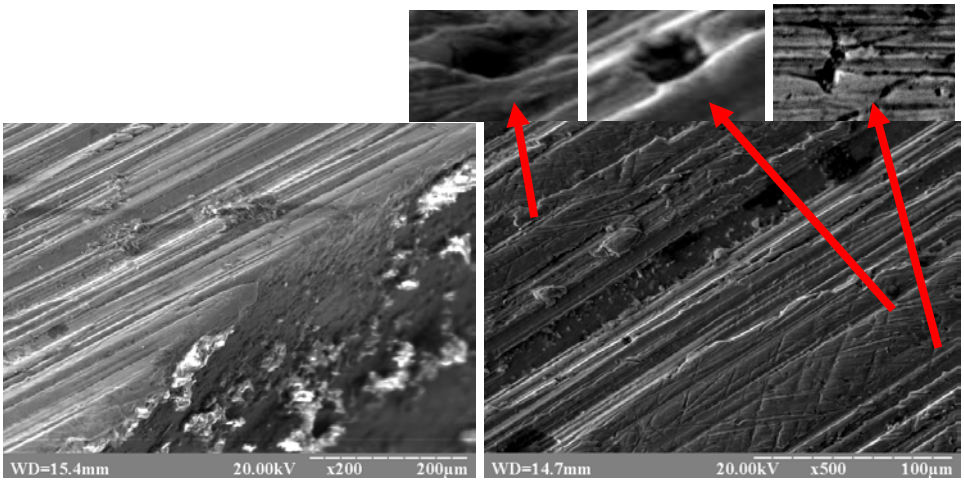


Рис. 3.20. Стійкість різальних пластин зі сталі Р6М5 з комбінованими покриттями взалежності від виду обробки при точінні сталі 30ХГСА.

В 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. 3.21). Абразивнй знос полягає у тому, що при відділенні дрібних часток оброблюваного матеріалу чи покриття, стикаючись з поверхнею РІ виривають тверді складові структури ІМ, що призводить до утворення тріщин і руйнування поверхневих шарі різальних крайок РІ (рис. 3.21).

Як показали проведені дослідження, механізм руйнування різальної крайки сталі Р6М5 після ЛО і наступного азотування внаслідок абразивного зношування в процесі МО (точіння) відбувається в результаті утворення виривів (виривання мікрооб'єму поверхневого шару) і тріщин на контактній

площадці передньої поверхні РІ. Ці вириви і тріщини, які розташовані безладно мають різні розміри і характер поширення (перпендикулярно та паралельно напрямку тертя) та утворюють сітки тріщин. Більша кількість тріщин спостерігається біля краю різальної крайки, у напрямку до середини контактної площадки їх стає менше. Більші тріщини спостерігаються на ділянці, що примикає до різальної крайки інструменту, що є результатом її деформації.



а б

Рис. 3.25. Поверхні тертя РІ зі сталі Р6М5 з комбінованим покриттям після точіння сталі 30ХГСА при збільшенні в х 200 (а) і х 500 (б)

Пластична деформація контактної поверхні також може сприяти збільшенню швидкості утворення тріщин та виривів. Процес руйнування різальної крайки починається з зародження і повільного розростання тріщин на її поверхні з часом. Крім того, впливати на швидкість зародження і поширення тріщин внаслідок дії абразивної частинки може утворення мікродефектів в поверхневих шарах РІ, які можуть бути наявними внаслідок азотування. При довгому часі роботі РІ подальше зростання тріщин відбувається за рахунок втомних процесів через що вириваються ослаблені об'єми поверхневих шарів.

Внаслідок крихкого руйнування крайки, яке відбувається через утворення та збільшення тріщин на близькі до неї ділянці, відбувається викришування твердих частинок, які в свою чергу можуть виступать в ролі абразиву.

Таким чином, за рахунок сітчасто-стільникової схеми ДЛО та наступного азотування процес тріщиноутворення та руйнування поверхневих шарів сталі

Р6М5 сповільнюється впорівнянні з азотуванням, а зносостійкість підвищується внаслідок поєднання азотованих крихких (пластичних) ділянок з підвищеною твердістю і блокуються розвиток процесів схоплення та адгезійного зношування, що сприяє підвищенню зносостійкості при МО. При МО спостерігається утворення вторинних структур (рис. 3.26).

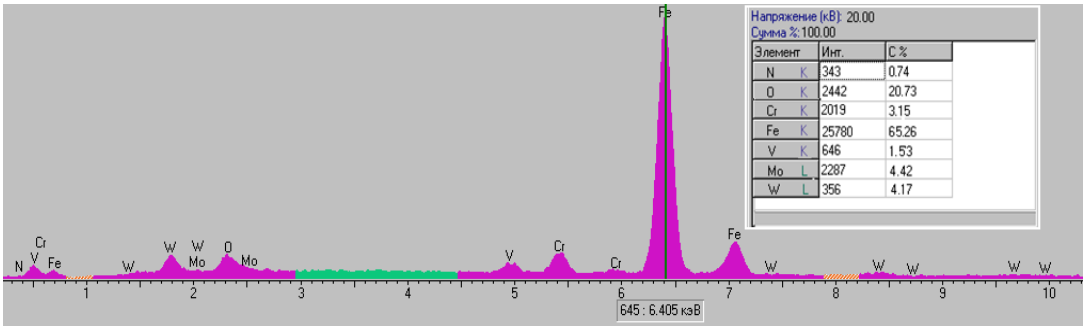


Рис. 3.26. Результати мікроренгеноспектрального аналізу поверхні тертя РІ зі сталі Р6М5 (ЛО і наступне азотування) після точіння.

3.6. Висновки до розділу

1. Вперше розроблені технологічні процеси зміцнення поверхневих шарів сталі Р6М5 попередньою ДЛО і наступним азотуванням і досліджені особливості їх структуроутворення.

2. Встановлено, що попередньо сформований структурно – фазовий стан визначає якісний та кількісний характер змін в азотованому шарі. ЛО сприяє утворенню високої щільності легкорухомих дислокацій, диспергуванню вихідної зеренної структури та збільшенню протяжності границь зерен. За рахунок цього підвищується розчинність азоту в кристалічній решітці сталі Р6М5.

3. Показано, що за рахунок ЛО підвищується концентрація азоту в α_N – і γ'– фазах. Без попередньої ЛО в азотованому шарі переважно міститься ε – фаза, тоді як після ЛО основу нітридного шару складає γ' – фаза.

4. Встановлено, що попередня ЛО прискорює процеси дифузії азоту в поверхневі шари сталі Р6М5. При азотуванні протягом 1 год. на ділянках з ЛО товщина азотованого шару становить 0,25 мм, а на ділянках без ЛО – 0,02 мм.

5. Аналітичними розрахунками НДС встановлено, що в умовах тертя

можливо застосовувати 60 – 75 % зміцнюючих ділянок (ДЛО з наступним азотуванням) від загальної площі на яких спостерігається мінімальні локальні дотичні напруження у матриці.

6. Встановлено, що оптимальною площею ДЛО за рахунок якої відбувається підвищення зносостійкості і зменшення коефіцієнта тертя є площа, яка складає 60 – 80 % від загальної площі поверхні зразка, що узгоджується з аналітичними розрахунками НДС.

7. Встановлено, що завдяки зміцненню поверхневого шару попередньою ЛО за сітчасто – стільниковою схемою підвищується зносостійкість і контактна втомна міцність інструменту зі сталі Р6М5 з азотованим покриттям. Триботехнічні випробування сталі Р6М5 зміцненого ДЛО за різними схемами показали, що вищі стійкість, зносостійкість в умовах тертя ковзання та абразивну зносостійкість РІ зі сталі Р6М5 забезпечує сітчасто – стільникова схема в порівнянні з схемою острівного типу. Це обумовлено тим, що дискретні ділянки з різною твердістю і товщиною сприяють кращій припрацьовуваності покриття і мінімізують напруження при терті. Зносостійкість сталі Р6М5 після ДЛО з площею 70 % та наступного азотування збільшується у 1.5-1.7 разів, коефіцієнт тертя зменшується в 1,4 … 2,2 рази в порівнянні з азотуванням.

8. Встановлено, що за рахунок попередньої ДЛО і наступного азотування сталі Р6М5 можливо підвищити її зносостійкість, а також змінити закономірності деформації поверхневих шарів і хімічні властивості поверхні тертя. Після триботехнічних випробувань мікрорентгеноспектральним аналізом було встановлено наявність на поверхнях тертя кисню, який утворює оксидніх плівки, що покращує умови тертя, підвищує зносостійкість і абразивну стійкість сталі Р6М5.

9. Встановлено механізм зношування РІ зі сталі Р6М5 після точіння сталі 30ХГСА. В результаті мікроскопічних досліджень виявлено, що на поверхні тертя є прояви абразивного і втомного зношування, які полягають у втисненні абразивної частинки, дряпання і виривів поверхневих шарів РІ та утворення і поширення тріщин.

РОЗДІЛ 4
ЗМІЦНЕННЯ СТАЛІ Р6М5 БАГАТОКОМПОНЕНТНИМИ ПОКРИТТЯМИ НА ОСНОВІ АЗОТУ ТА ТИТАНУ, АЗОТУ ТА ХРОМУ

Як вже зазначалось (розділ 1), застосування багатошарових покриттів є перспективним напрямом підвищення зносостійкості інструментальних сталей, зокрема швидкорізальної сталі Р6М5, їх отримують в одному чи в декількох технологічних циклах одним чи декількома методами. При цьому кожен шар багатошарового композиційного покриття виконує певні службові функції.

Важливу функцію виконує поверхневий шар, основне призначення якого – максимальне зниження схильності інструментального матеріалу до адгезійної взаємодії з оброблюваним матеріалом. Проміжний шар виконує бар'єрні функції щодо стримування інтердифузійних процесів та зменшення інтенсивності теплового потоку від фрикційних джерел на контактних площадках передньої і задньої поверхонь інструменту. Шар, що безпосередньо примикає до матеріалу інструменту, повинен мати кристалохімічну сумістність матеріалу для забезпечення максимальної міцності адгезійного зв'язку покриття [29, 39, 67].

Поєднання таких методів, як азотування та ДМ надасть можливість отримати підвищену теплостійкість, твердість та зносостійкість дозволить забезпечити економічність та екологічність процесу. Проте для ефективного впровадження технологій в виробництво потрібно вивчити склад, фізико-механічні, триботехнічні властивості та дослідити механізми зношування і процеси, які відбуваються на поверхнях при терті.

Проведення додаткової ДЛО після ДМ підвищить фізико-механічні і триботехнічні властивості сталі Р6М5, а також надасть можливість отримати сприятливий НДС при МО, що вплине на триботехнічні властивості сталі Р6М5 з багатокомпонентними покриттями (азототитанування та азотохромування).

4.1 Фазовий склад, фізико-механічні та триботехнічні властивості сталі Р6М5 після азототитанування, азотохромування та дискретної лазерної обробки

Процеси азототитанування та азотохромування здійснювали в декілька етапів: на першому етапі було проведене азотування, на другому етапі проводили дифузійну металізацію – титанування та хромування [167-169]. Насичення проводили в закритому реакційному просторі (в якості насичуючої суміші використовували порошки титану і хрому) у середовищі хлору, також додавали невелику кількість деревного вугілля для підвищення насичення вуглецем насичуючої суміші (завдяки вуглецю, який входить до складу газової фази формуються покриття на основі карбідів титану та хлору на поверхні) [108]. Чотирихлористий вуглець (CCl_4) вводили для того щоб збільшити насичення вуглецем та для транспортування титану та хрому до оброблюваної поверхні зразків зі сталі Р6М5.

Фазовий аналіз сталі Р6М5 після азототитанування показав утворення в структурі двох окремих фаз: карбід титану TiC та нітрид титану TiN, а після азотохромування спостерігається утворення двох карбідних фаз – $Cr_{23}C_6$, Cr_7C_3 та нітриду хрому Cr_2N [167-169].

В таблиці 4.1 наведені результати досліджень фазового складу, товщини, мікротвердості та показника мікрокрихкості покриттів.

Таблиця 4.1

Фізико-механічні властивості сталі Р6М5 після азототитанування та азотохромування

Вид обробки	Фазовий склад	Товщина, мкм	Мікротвердість, ГПа	Показник мікрокрихкості
Азотування	$Fe_{2-3}N$	8,0	6,5	12,7
	Fe_4N	8,5	14,0	12,2

Азототитанування	TiC	7,3	37,6	87,2
	TiN	4,0	32,5	43,5
Азотохромування	$Cr_{23}C_6$	6,0	19,3	23,5
	Cr_7C_3	5,0	17,3	19,9
	Cr_2N	5,5	9,0	17,3

4.2. Дослідження триботехнічних властивостей сталі Р6М5 з багатокомпонентими покриттями

Встановлено, що сталь Р6М5 після азототитанування володіє високою мікротвердістю, але низькою мікрокрихкістю, а після азотохромування нижчою мікротвердістю проте нижчою мікрокрихкістю, що позначиться на показниках зносостійкості [167-169].

Триботехнічні дослідження в умовах тертя ковзання без змащування проводили за схемою ролик – ролик на машині тертя СМЦ-2.

На рис. 4.1-4.4 наведено результати триботехнічних досліджень багатокомпонентних покриттів. В результаті випробувань сталі Р6М5 після різних видів обробки встановлено, що максимальною зносостійкістю на всіх режимах випробувань володіє сталь Р6М5 після азотохромування. Висока зносостійкість азотохромованих покриттів визначається поєднанням властивостей – низький коефіцієнт тертя та висока пластичність, а також низька мікрокрихкість[170].

Встановлено, що азототитанування сталі Р6М5 підвищує її зносостійкість у 1.3-1.5 рази в порівнянні з азотуванням за рахунок більшої твердості поверхневих шарів, а також тим, що азототитановані покриття мають більш високу міцність зчеплення з основою та хімічну інертність [167, 168].

Варто відзначити, що при більш жорстких умовах випробування (Р = 4 МПа, V = 4 м/с) за зносостійкістю азотована сталь наближається до азохромованої та азототитанової, що обумовлено зниженням твердості сталі при високотемпературній металізації (1050 ºС) до 57–58 HRC. В той час, як при

азотуванні (t = 540 ºС) зберігається твердість вихідної загартованої сталі. Тому зразки після азототитанування і азотохромування піддавали ДЛО з метою загартування сталі, як підкладки під покриттями. ЛО проводили дискретно точками діаметром 3 мм із площею обробк 60-75 % від загальної площі обробленої поверхні [167-169]. Додаткова ДЛО підвищує твердість сталі, яка є підкладкою під покриттям та створює благоприємний НДС [156-159].

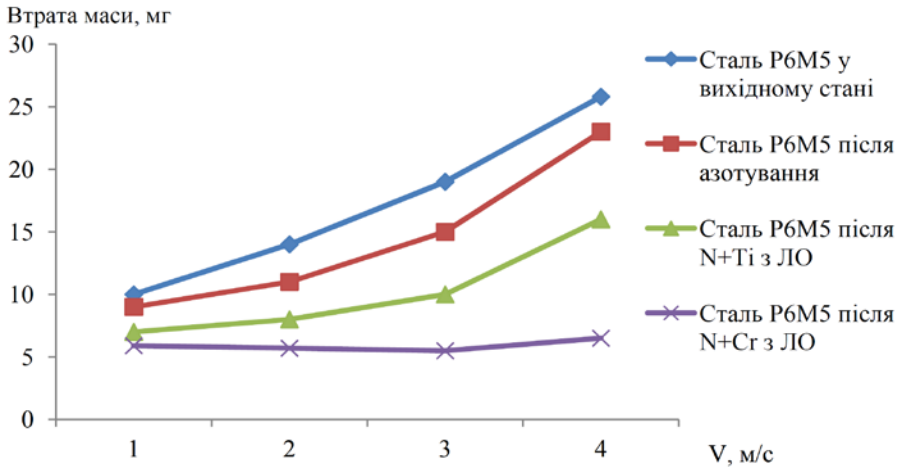


Рис. 4.1. Зносостійкість сталі Р6М5 в залежності від виду обробки і швидкості ковзання.

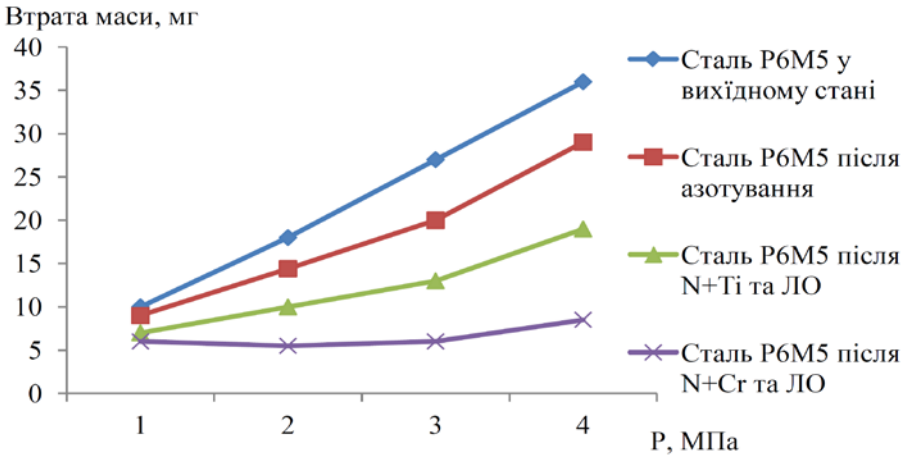


Рис. 4.2. Зносостійкість сталі Р6М5 в залежності від виду обробки і навантаження.

Після додаткової ЛО твердість зміцнених ділянок сталі Р6М5 внаслідок самогартування становила 60–62 HRC. Результати триботехнічних випробувань (рис. 4.1-4.4) свідчать про ефективність такої обробки сталі, яка експлуатується при високих локальних навантаженнях. Зносостійкість сталі з

багатокомпонентними покриттями після ДЛО вища в 1,5 – 1,7 рази порівняно з покриттями без ЛО і в 1,7 – 2,0 рази порівняно з азотованою сталлю, а у порівнянні зі сталлю у вихідному стані у 3.0-3.5 раз. Це зумовлено тим, що дискретно загартований шар сталі, де зосереджуються максимальні напруження тертя, забезпечує рівномірний розподіл навантаження в системі «сталь – покриття», чинить опір руйнуванню покриття під дією тангенціально направлених сил тертя, демпфірує їх, тобто слугує міцною основою для покриття, підвищуючи його працездатність у екстремальних умовах експлуатації, виключаючи його продавлювання, викришування та відшарування [167-169].

Характерними змінами зносу при терті за різних умов випробування є те, що при менших умовах випробувань спостерігається більш плавне зношування, проте, при більш важчих – зношування зразків після азототитанування різко зростає, а після азотохромування має плавнішу зміну. Це пояснюється тим, що оксиди титану при більш важчих умовах та високих температур в зоні контакту починають інтенсивніше руйнуватися на відміну від оксидів хрому, а також відомо [164, 170], що карбіди хрому при більш високих температурах у зоні тертя є більш твердими і стійкими в порівнянні з карбідами титану. Проте, на нашу думку, при більш важчих режимах випробувань, при великих температурах іде інтенсивне окислення в зоні тертя ця плівка витискується з поверхні тертя та руйнується і знос різко збільшується.

Крім того, азототитановані покриття володіють вищою мікротвердістю, але вони більш крихкі в порівнянні з азотохромуванням, яке має меншу мікрокрихкість, що й забезпечує йому менший знос.

Внаслідок проведених досліджень були отримані залежності коефіцієнта тертя від швидкості ковзання та від навантаження (рис. 4.3, 4.4). Зі збільшенням швидкості тертя спостерігається плавне зменшення коефіцієнта тертя. При швидкості випробувань V = 4 м/с спостерігається різке підвищення коефіцієнта тертя для сталі Р6М5 після азотування та плавне, рівномірне після азототитанування та азотохромування.

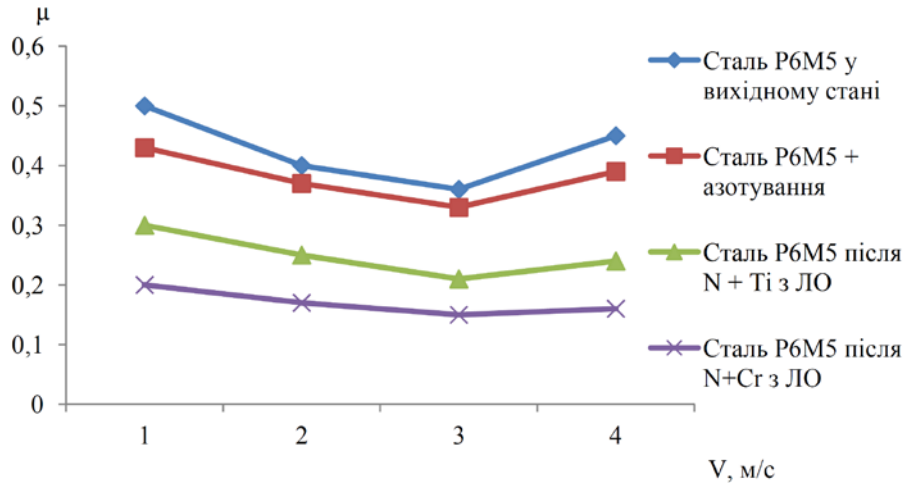


Рис. 4.3. Коефіцієнт тертя сталі Р6М5 в залежності від виду обробки і швидкості ковзання

Зниження коефіцієнта тертя можна пояснити утворенням в процесі тертя вторинних структур – оксидних плівок, які виступають в ролі твердого мастила [27, 170, 164], до складу яких можуть входити тверді частки дрібнодисперсних нітридів і карбідів. При важчих умовах випробувань вони починають інтенсивніше руйнуватись. За рахунок зниження коефіцієнта тертя можна зменшить температуру різання в зоні контакту «РІ-оброблюваний матеріал».

Коефіцієнт тертя зменшується у 2.2-2.5. Найнижчий коефіцієнт тертя має сталь Р6М5 після азотохромування.

Зміна коефіцієнта тертя взалежності від навантаження характеризується рівномірним його підвищенням при збільшенні навантаження (рис. 4.4).

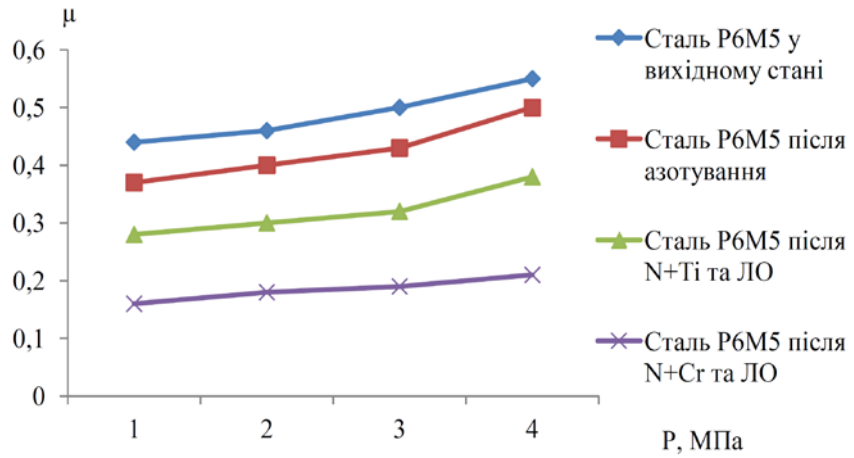
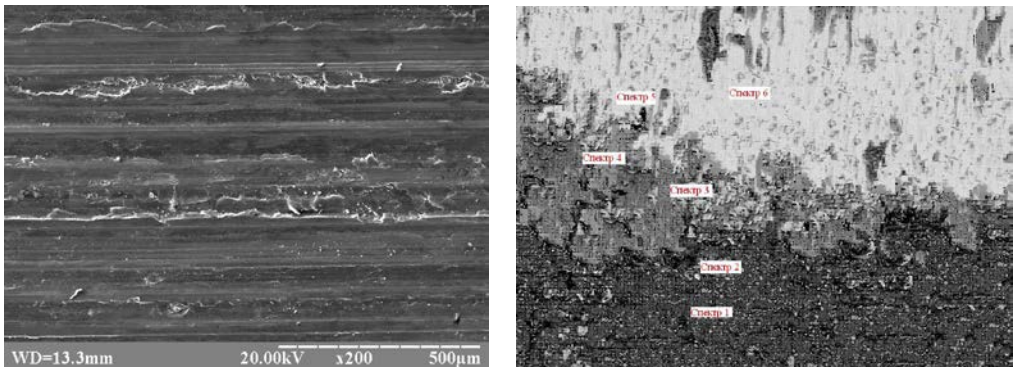


Рис. 4.4. Коефіцієнт тертя сталі Р6М5 в залежності від виду обробки і навантаження.

При дослідженні поверхонь тертя зразків не спостерігається схоплювання, тріщин, поверхневих дефектів, викришування, морфологічна будова поверхонь тертя характеризується хвилястістю субмікрорельєфу через що можливо сказати, що відбувається рухливість мікрооб'ємів поверхневого шару.

Після проведених випробувань досліджували хімічний склад поверхонь тертя. Встановлено, що на поверхні тертя сталі Р6М5 після азототитанування знаходиться значна кількість кисню (рис.4.5, табл. 4.2), який пов’язаний в оксиди металів, адже відомо [27, 164], що в результаті локального підвищення температури починається формування оксидів елементів покриття та основи.



а б

Рис. 4.5. Поверхня тертя сталі Р6М5 після азототитанування а – загальний вид поверхні тертя, б – точки проведення рентгеноструктурного аналізу (V = 1 м/с, P = 1 МПа) х 500.

Таблиця 4.2

Розподіл хімічних елементів по поверхні зношування сталі Р6М5 після азототитанування

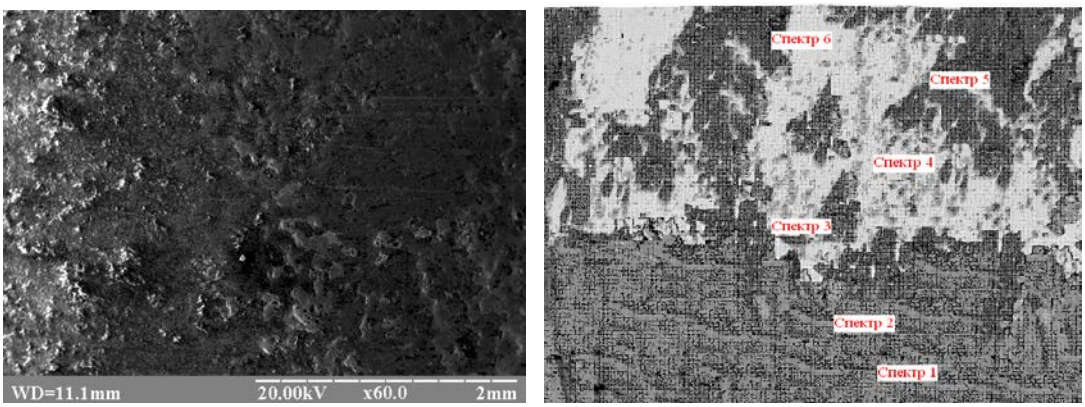
№ спектру	Вміст елементів %, (мас.)								
	C	Ti	Fe	V	W	O	Cr	Si	Mo
1	20,20	14,27	56,34	-	2,50	4,83	1,86	-	
2	15,30	35,70	39,69	-	1,44	7,62	0,25	-	
3	+	4,55	59,60	0,50	4,85	28,50	1,30	-	0,7

4	+	2,36	61,76	0,39	4,28	29,55	1,66	-	
5	+	1,92	84,93	0,9	4,78	3,26	2,74	0,16	1,31
6	+	-	85,30	1,7	5,1	-	4,3	0,2	3,4

На поверхні тертя після азототитанування точка спектру 1, 2 відповідає фазовому складу поверхні після азототитанування – карбід титану TiC. Крім вуглецю та титану ця зона містить кисень, залізо, вольфрам та хром, які переносяться в процесі тертя контртілом та утворють оксиди так, як спостерігається значний вміст на поверхні кисню. В точках спектрів 2, 3 (в зоні ближчій до основи) зафіксована максимальна кількість кисню, можливо сказати, що це пов’язано з утворенням оксидів титану та заліза. Також в цій зоні присутні W, Cr і V. В точках спектрів 5, 6 (осова сталі Р6М5) присутні осередки оксидних ділянок за напрямком тертя. Це, більше всього, пов’язано з утворенням оксидів титану і заліза, які володіють хорошими захисними властивостями в процесі тертя [164].

На поверхні тертя сталі Р6М5 після азотохромування точка спектру 1, 2 відповідає фазовому складу поверхні після азотохромування (рис. 4.6, табл. 4.3). в точці спектру 3 спостерігається наявність невеликої кількості кисню, заліза, вуглецю, хрому, вольфраму та ванадію, які знаходяться на межі розподілу покриття та основи сталі Р6М5. В точках спектрів 5, 6 (осова сталі Р6М5) присутня значна кількість кисню, що говорить про утворення вторинних сполук (оксидних плівок), які покращують процеси тертя [164].

Внаслідок проведеного мікрорентгеноспектрального аналізу можливо сказать, що матеріал покриття приймає активну участь у формуванні вторинних структур, які сприяють підвищенню зносостійкості.



а б

Рис. 4.6. Поверхня тертя сталі Р6М5 після азототитанування а – загальний вид поверхні тертя, б – точки проведення рентгеноструктурного аналізу (V = 1 м/с, Р = 1 МПа) х 500.

Таблиця 4.3

Розподіл хімічних елементів на поверхні зношування сталі Р6М5 після азотохромування

№ спектру	Вміст елементів %, (мас.)								
	C	N	Fe	V	W	O	Cr	Si	Mo
1	15,21	4,70	-	-	-	-	80,00	-	
2	+	6,71	-	-	-	3,15	90,14	-	
5	+	-	56,60	0,29	4,90	31,03	7,18	-	
6	+	-	57,10	0,40	4,53	31,98	5,99	-	
3	+	-	87,40	1,4	5,0	3,1	3,1	0,2	2,9
4	+	-	87,88	1,6	5,3	-	0,92	0,3	4,0

Дослідження абразивної зносостійкості сталі Р6М5 після азототитанування та азотохромування. На поверхні тертя спостерігаються рівномірні за глибиною «борозни» та вириви характерні для абразивного зношування. В якості абразиву виступають окремі, відокремлені частинки покриття (рис. 4.7).

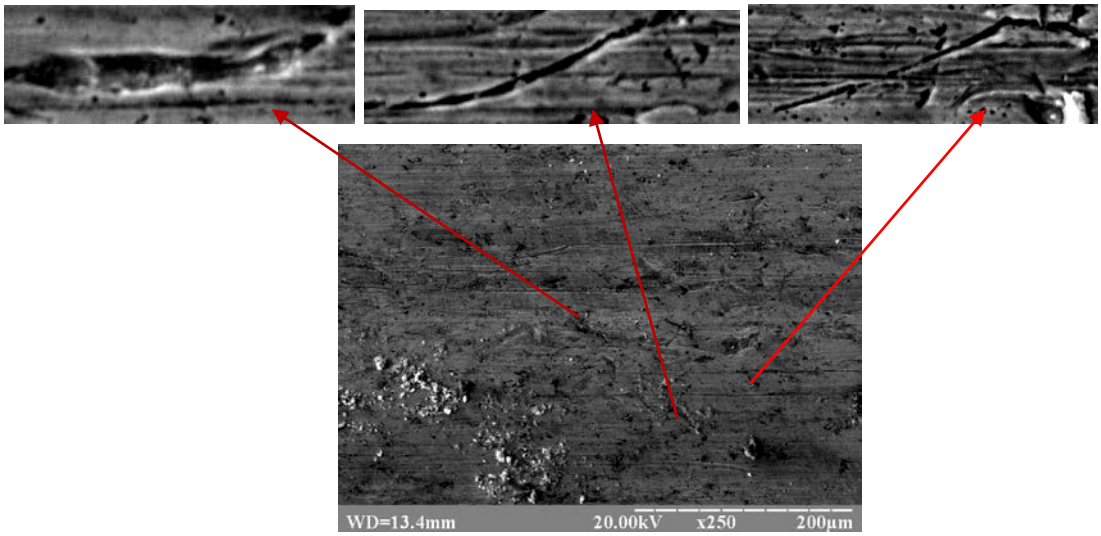


Рис. 4.7. Поверхня тертя сталі Р6М5 з азототитанованим покриттям після випробування на абразивну зносостійкість

Опосередковано можна сказати, що спостерігається кореляція між зносостійкістю в умовах тертя та ковзання і абразивною зносостійкістю. Азотохромоване покриття показує найкращі результати зносостійкості (рис. 4.8).

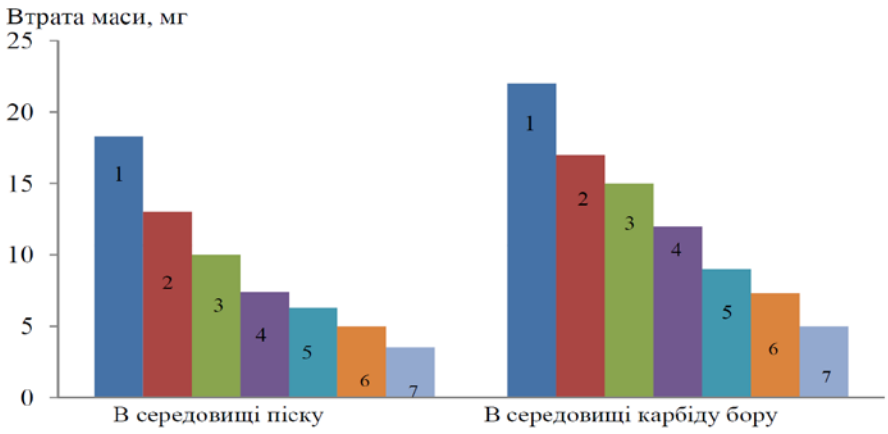


Рис. 4.8. Абразивна зносостійкість сталі Р6М5 в залежності від виду обробки та твердості абразиву: 1 – сталь Р6М5 у вихідному стані; 2 – азотування; 3 – азотування+ЛО; 4 – азототитанування; 5 – азототитанування+ЛО; 6 – азотохромування; 7 – азотохромування+ЛО.

Встановлено, що при абразивному зношуванні поверхневих шарів сталі Р6М5 з багатокомпонентними покриттями утворюються вторинні структури у вигляді дисперсних структур до складу яких входять оксиди титану, хрому та

ін., а товщина і властивості їх залежить від навантаження і швидкості тертя, які в свою чергу впливають на температуру в зоні тертя і на інтенсивність окислювання. Це свідчить, що матеріал покриття приймає активну участь у формуванні вторинних структур

Дослідження стійкості РІ зі сталі Р6М5 після азототитанування та азотохромування. В результаті дослідження стійкості РІ зі сталі Р6М5 з багатокомпонентними покриттями (азототитанування та азотохромування) при точінні заготівок зі сталі 30ХГСА з охолодженням в розчині емульсолу «Укрінол» встановлено, що стійкість азототитанованих та азотохромованих пластин вища, ніж стійкість азотованих пластин у 1,6 та 1,9 рази відповідно, в порівнянні з азотованою сталлю, а у порівнянні зі сталлю у вихідному стані у 3.5 раз (рис. 4.9).

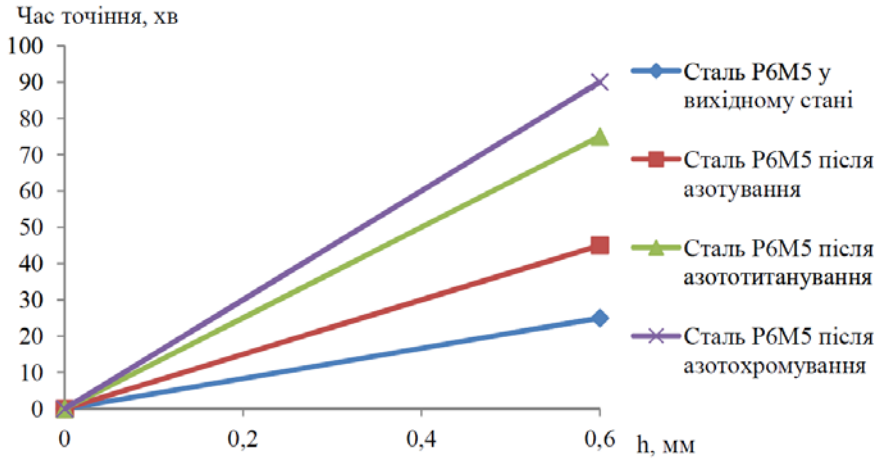


Рис. 4.9. Стійкість різальних пластин зі сталі Р6М5 з комбінованими покриттями взалежності від виду обробки при точінні сталі 30ХГСА.

При мікроструктурному дослідженні сталі Р6М5 з багатокомпонентними покриттями на основі нітридів і карбідів Ті і Cr утворення та розвиток тріщин спостерігається за більш високих швидкостей різання порівняно з азотованою сталлю.

В результаті мікроскопічних досліджень встановлено, що на поверхні тертя РІ зі сталі Р6М5 після точіння сталі 30ХГСА є прояви абразивного зношування, які полягають у втисненні абразивної частинки та дряпання і виривів її поверхні вириваючи тверді складові ІМ, що призводить до утворення тріщин і руйнування поверхневих шарі різальних крайок РІ (рис. 3.10).

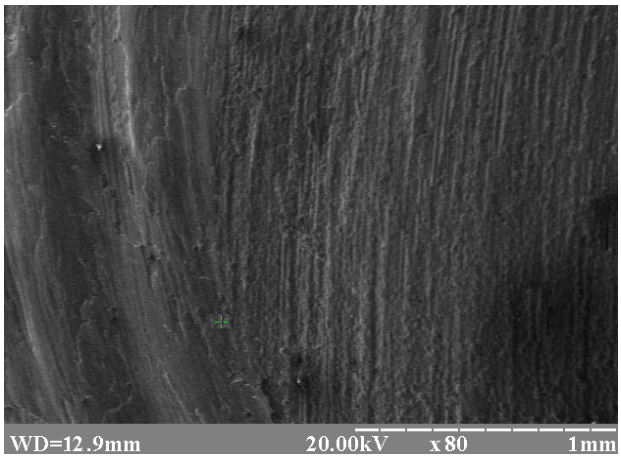


Рис. 4.10. Поверхня тертя РІ зі сталі Р6М5 після азототитанування

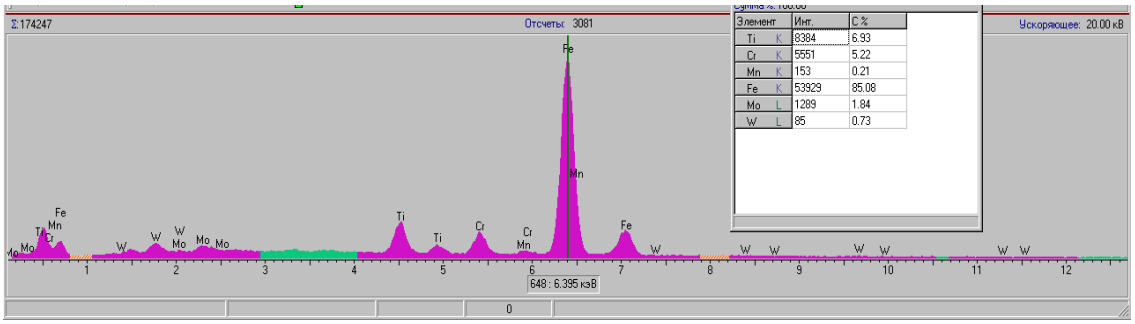


Рис. 4.11. Результати мікроренгеноспектрального аналізу поверхні тертя РІ зі сталі Р6М5 (азототитанування) після точіння

В результаті проведених досліджень можна сказать, що за рахунок високої твердості та низького коефіцієнта тертя при даних умовах випробувань, азототитановані та азотохромовані покиття є дифузійним бар'єром, зменшують зношування РІ і сили різання, схильність виробу до зварювання з оброблюваним матеріалом, налипання тим самим покращують якість обробленої поверхні.

4.3 Висновки до розділу

1. Встановлено, що при азототитануванні на сталі Р6М5 формується покриття з шарів карбіду титану TiC та нітриду титану TiN з мікротвердістю 38,0 – 38,5 та 27,0 – 27,2 ГПа відповідно; при азотохромуванні з шарів карбідів $Cr_{23}C_6$, Cr_7C_3 та нітриду хрому Cr_2N з мікротвердістю 18,2 – 18,5, 16,2 – 16,8 та 8,8 – 9,0 ГПа відповідно.

2. Зносостійкість сталі Р6М5 в умовах тертя ковзання без змащування із захисними покриттями (азототитанування, азотохромування) порівняно з азотуванням зростає в 1,7 – 2,0 рази, а після додаткової дискретної лазерної обробки сталі в 2,2 – 3,0 рази. Це обумовлено тим, що дискретно загартований шар сталі слугує міцною основою для покриття, підвищуючи його працездатність у екстремальних умовах експлуатації, виключаючи його продавлювання, викришування та відшарування.

3. При дослідженні абразивної зносостійкості сталі Р6М5 з багатокомпонентними покриттями, встановлено, що існує кореляція між зносостійкістю в умовах тертя та ковзання і абразивною зносостійкістю. Азототитановані та азотохромовані покриття показують найкращі результати зносостійкості.

4. Якщо проаналізувати результати випробувань зносостійкості сталі Р6М5 з багатокомпонентними покриттями в умовах тертя ковзання без мащення можна відзначити, що матеріал покриття сприяє формуванню вторинних структур, які залежать від хімічного складу покриттів і позитивно впливають на зносостійкість.

РОЗДІЛ 5
ПІДВИЩЕННЯ ТРИБОТЕХНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СТАЛІ Р6М5 ІОННО-ПЛАЗМОВИМ МЕТОДОМ НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТІВ

На підприємствах при виготовленні РІ існує проблема забезпечення високої його зносостійкості при МО різанням важкооброблюваних матеріалів. Такі матеріали під час МО викликають підвищений знос РІ, а також обробка таких матеріалів характеризується низькою продуктивністю процесу різання, великими втратами енергії, і, як наслідок, труднощами в забезпеченні потрібних параметрів стану поверхневого шару оброблюваного матеріалу відповідно до умов експлуатації готових виробів. Тому на його поверхні наносять захисні покриття, які покращують триботехнічні властивості, що впливає на працездатність та зносостійкість РІ.

Проте, одношарові зносостійкі покриття на РІ не в повній мірі задовольняють вимоги виробництва. Тому, при розробці захисних покриттів для РІ найбільш перспективним напрямком є нанесення багатошарових градієнтних покриттів, що забезпечить їх хорошу адгезію, припрацйовуваність, зносостійкість, опір втомному руйнуванню, оптимальний НДС та фізико-механічні і триботехнічні характеристики [29, 42].

Для досягнення оптимальних показників процесу тертя і поверхневої міцності велику роль відіграє явище структурної пристосовуваності – трибосистема при зовнішньому впливі може змінювати і потім стійко відтворювати свою структуру в енергетично вигідному напрямку [171, 172]. Досягти оптимальної структурної пристосовуваності зносостійких покриттів можливо за рахунок підбору хімічних елементів для їх нанесення, адже отримання вторинних структур заданого типу з потрібними властивостями та їх зв'язок з основним матеріалом значно залежить від хімічного складу покриття. Елементи, які входять до складу покриттів забезпечують їх фізико-механічні і триботехнічні властивості [171, 172].

Відомо [17, 173], що РІ, як і будь-який об’єкт трибосистеми, піддається

структурній пристосовуваності. Утворені вторинні структури на робочих поверхнях РІ під час припрацювання в значній мірі визначають його подальшу зносостійкість, тобто зносостійкість і працездатність РІ визначаються вихідною структурою матеріалу, а також станом контактних шарів, сформованих під час припрацювання (на початковому періоді експлуатації) [17, 173].

Тому, для створення оптимальних умов структурної пристосовуваності тобто покращити його припрацьовуваність, а також підвищити зносостійкість було розроблено технологічний процес нанесення захисного БГП [122]. Завдяки градієнтним властивостям покриття можливо оптимізувати НДС в системі «основа-покриття», підвищити зносостікість та експлуатаційні і фізико-механічні властивості РІ.

5.1. Математичне моделювання формування зносостійких іонно-плазмових градієнтних покриттів на основі Ti, Hf та Si.

Вибір критеріїв оптимізації, керованих факторів та побудова плану експерименту. При розробці технологічного процесу нанесення зносостійких покриттів потрібно вирішувати задачі щодо їх оптимізації. Ефективність прийнятих оптимізаційних рішень залежить від правильності вибору критеріїв, за якими буде оцінюватися працездатність сформованого зносостійкого поверхневого шару у заданих умовах експлуатації.

Комплекс вимог до критеріїв оптимізації в роботі полягав у наступному [132, 143]: простий, зрозумілий фізичний зміст критерію та достатньо повне характеризування ним об'єкту або процесу, що досліджується; відповідність кожному значенню незалежних змінних одного (із точністю до випадкової помилки) значення відгуку; відтворюваність критерію, тобто збігання (з точністю до помилки експерименту) отриманих його значень при повторенні дослідів у номінально однакових умовах; вимірюваність значень критерію при будь-якій комбінації обраних рівнів факторів; ефективність критерію як з точки зору досягнення мети, так і у статистичному відношення.

В зв’язку з тим, що основною задачею дослідження є підвищення триботехнічних властивостей сталі Р6М5, тому якості критеріїв оптимізації обиралися параметри, які можуть найбільш вичерпно та якісно охарактеризувати саме ці властивості матеріалів. Зношування – це процес руйнування та відділення матеріалу з поверхні твердого тіла та (або) накопичення його залишкової деформації при терті, який проявляється у поступовій зміні розмірів та (або) форми тіла [174]. Знос – результат зношування, який визначається у встановлених одиницях (об′єму, маси, довжини тощо) [174].

Під час вивчення процесів тертя необхідно розглядати різноманітні взаємодій поверхонь тертя: підйому по мікронерівностях абсолютно твердого тіла, пружного та пластичного деформування мікронерівностей, подолання ними міжатомної взаємодії, схоплення металів, утворення різного типу плівок тощо. Авторами [175] показано, що кількісною оцінкою взаємодії поверхонь у всіх випадках є коефіцієнт пропорційності між тангенціальною реакцією та нормальним навантаженням – коефіцієнт тертя. Значення саме цього коефіцієнту є одним з критеріїв, за яким проводять класифікацію тертя за видами, адже він, аналогічно інтенсивності зношування, залежить як від фізико-механічних властивостей контактуючих матеріалів, так і від умов тертя – питомого навантаження, швидкості ковзання, мастильного середовища тощо. Не дивлячись на те, що коефіцієнт тертя є функціонально пов’язаним із зносостійкістю, самостійно він не розкриває всіх часткових особливостей механізму зношування пар тертя в різних умовах мащення [176].

Таким чином, у даній роботі ваговий знос (Y_1) та коефіцієнт тертя (Y_2) було обрано в якості критеріїв оптимізації зміцнених поверхневих шарів РІ (табл. 5.1).

До керованих факторів висувають важливу вимогу, яка полягає у відсутності їхньої взаємозамінності. Крім цього, фактори повинні відповідати наступним вимогам: бути керованими; не повинні залежати від інших змінних; сукупність обраних незалежних змінних повинна відповідати вимогам

сумісності; інтервал зміни кожного фактору не повинен бути малим, одночасно, він не повинен бути дуже широким; рівні варіювання факторів повинні обиратися з урахуванням апріорної інформації щодо характеру впливу на відгук кожної змінної, точності підтримки рівня, здатності контрольно-вимірювальної апаратури, методів реєстрації, виду залежності відгуку від даної змінної; незалежні змінні повинні бути однозначними; вибір факторів повинен бути досить повним; точність фіксації факторів повинна бути високою (мінімальна різниця між значеннями сусідніх рівнів варіювання змінних повинна бути, принаймні, на порядок вище точності установки даного параметра).

Таблиця 5.1.

Мета та обмеження критеріїв оптимізації

№	Назва критерію оптимізації	Мета	Позначення	Обмеження
1	Величина зносу (мг)	МІНІМУМ	Y_1	–
2	Коефіцієнт тертя	МІНІМУМ	Y_2	–

В роботі застосовували комплексний підхід при вивченні процесу при виборі керованих факторів, тобто враховувався вплив конструктивних, технологічних та експлуатаційних факторів. Використовуючи методи експертної оцінки [177-179] і, зробивши серію відсіюючих експериментів, було отримано середній апріорний ранжируваний ряд факторів, які впливають на технологічний процес іонно-плазмового нанесення покриттів (рис. 5.1).

Для проведення моделювання процесу нанесення вакуумних іонно-плазмових градієнтних покриттів на основі аналізу проведеного ранжирування було визначено групу факторів, що більше за всіх впливають на величину критеріїв оптимізації, та встановлено рівні їх варіювання. Тому в матрицю планування, як керовані фактори, були внесені: тип покриття (X_1), товщина покриття (X_2), тиск реакційного газу (X_3), швидкість ковзання (X_4) та експлуатаційне навантаження (X_5) в умовах тертя (табл. 5.2).

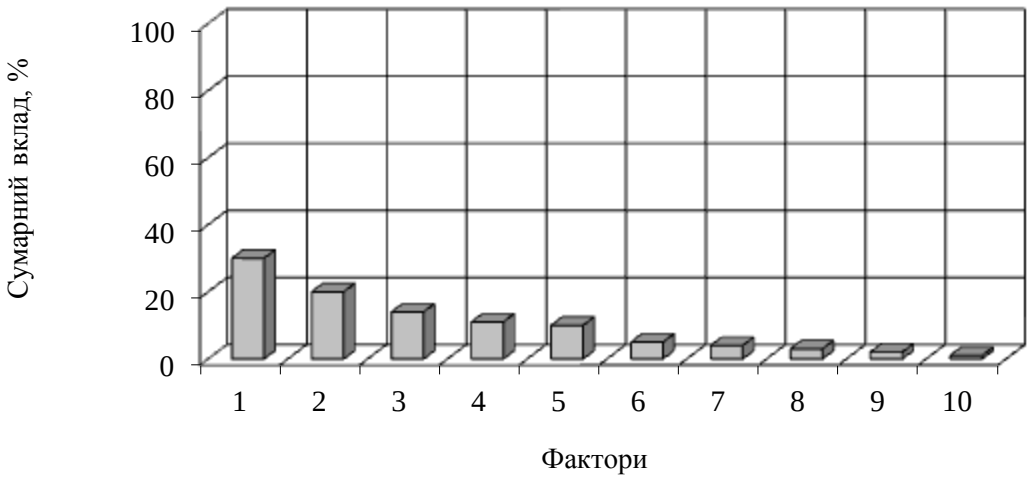


Рис. 5.1. Ранжируваний ряд конструктивних, технологічних та експлуатаційних факторів: 1 – тип покриття; 2 – товщина покриття; 3 – тиск реакційного газу; 4 – експлуатаційне навантаження; 5 – швидкість ковзання; 6 – робочий струм нанесення; 7 – робоча напруга нанесення; 8 – струм дуги випаровувача; 9 – напруга випаровувача; 10 – склад реакційного газу.

Таблиця 5.2.

Фактори та рівні їх варіювання

№	Фактори	Позначення	Рівні варіювання		
1	Покриття (%)	X1	Ti – Hf – Si		
			Ti = 50,5…65	Hf = 30…38,1	Si = 1,8…11,4
2	Товщина покриття (м)	X_2	$1 \cdot 10^{-6}$ ...$5 \cdot 10^{-6}$		
3	Тиск реакційного газу (Па)	X_3	0,267...0,48		
4	Швидкість ковзання (м/с)	X_4	1…4		
5	Навантаження (МПа)	X_5	1…4		

Внаслідок використання рекомендацій, що запропоновані в розділі 2 (п. 2.10), а також факторів та значень рівнів їх варіювання для рішення поставленої задачі, у роботі згенеровано план експерименту в кодованих значеннях, який представлений у табл. 5.3 у виді робочої матриці. Для якісного фактору: відповідність типу покриття X_1 значенням його хімічного складу (табл. 5.4).

Таблиця 5.3.

План експерименту в кодованих значеннях

№	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
2	0,25	0,75	0,25	0,75	0,25
3	0,75	0,25	0,75	0,25	0,75
4	0,125	0,625	0,875	0,875	0,625
5	0,625	0,125	0,375	0,375	0,125
6	0,375	0,375	0,625	0,125	0,875
7	0,875	0,875	0,125	0,625	0,375
8	0,0625	0,9375	0,6875	0,3125	0,1875
9	0,5625	0,4375	0,1875	0,8125	0,6875
10	0,3125	0,1875	0,9375	0,5625	0,4375
11	0,8125	0,6875	0,4375	0,0625	0,9375
12	0,1875	0,3125	0,3125	0,6875	0,5625
13	0,6875	0,8125	0,8125	0,1875	0,0625
14	0,4375	0,5625	0,0625	0,4375	0,8125
15	0,9375	0,0625	0,5625	0,9375	0,3125
16	0,03125	0,53125	0,40625	0,21875	0,46875

Таблиця 5.4.

Відповідність типу покриття X_1 значенням його хімічного складу

№	Кодоване значення фактору X_1	Хімічний склад покриття Ti – Hf – Si (%)		
		Ti	Hf	Si
1	0…0,142	65,0	30,0	5,0

продовження таблиці

2	0,143…0,285	63,1	31,3	5,8
3	0,286…0,428	60,3	32,4	1,8
4	0,429…0,571	57,5	33,0	9,5
5	0,572…0,714	55,0	35,0	10,0
6	0,715…0,857	52,3	37,1	10,6
7	0,856…1	50,5	38,1	11,4

Перехід від кодованих значень до натуральних проводився з використанням формули 2.2 (розділ 2, п. 2.10), що значно спрощує реалізацію плану експерименту (табл. 5.5).

Таблиця 5.5.

План експерименту в натуральних значеннях

№	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
1	4	$3{,}0 \cdot 10^{-6}$	0,374	2,5	2,5
2	2	$4{,}0 \cdot 10^{-6}$	0,320	3,3	1,8
3	6	$2{,}0 \cdot 10^{-6}$	0,427	1,8	3,3
4	1	$3{,}5 \cdot 10^{-6}$	0,453	3,6	2,9
5	5	$1{,}5 \cdot 10^{-6}$	0,347	2,1	1,4
6	3	$2{,}5 \cdot 10^{-6}$	0,400	1,4	3,6
7	7	$4{,}5 \cdot 10^{-6}$	0,294	2,9	2,1
8	1	$4{,}8 \cdot 10^{-6}$	0,413	1,9	1,6
9	4	$2{,}8 \cdot 10^{-6}$	0,307	3,4	3,0
10	3	$1{,}8 \cdot 10^{-6}$	0,467	2,7	2,3
11	6	$3{,}8 \cdot 10^{-6}$	0,360	1,2	3,8
12	2	$2{,}3 \cdot 10^{-6}$	0,334	3,0	2,7
13	5	$4{,}3 \cdot 10^{-6}$	0,440	1,6	1,2
14	4	$3{,}3 \cdot 10^{-6}$	0,280	2,3	3,4
15	7	$1{,}3 \cdot 10^{-6}$	0,387	3,8	1,9
16	1	$3{,}1 \cdot 10^{-6}$	0,354	1,7	2,4

Нанесення багатошарових градієнтних зносостійких іонно-плазмових покриттів на основі Ti, Hf, Si та їх експериментальні дослідження проводилось на основі одержаних результатів .

5.2. Технологічний процес формування градієнтного покриття.

Склад градієнтного покриття вибирали з урахуваням параметрів режиму роботи РІ для оптимізації умов хімічної взаємодії в системі «РІ-оброблюваний матеріал». Елементами, які входять до складу покриття вибрали Ti-Hf-Si.Титан надасть покриттю хорошу адгезію, нітриди титану і гафнію високу твердість, а кремній високу стійкість до окиснення [122].

БГП на основі Ti-Hf-Si наносили на установці типу «Булат» способом вакуумно-дугового осадження за відомою технологією на зразки та робочі пластинки токарних різців, виконанні з сталі Р6М5, у вакуумній камері установки [122].

Структура БГП складалася з нанесеного на інструментальну основу нижнього шару товщиною 0,5 мкм із Ti і верхнього шару покриття товщиною 5,0 мкм із нанокристалічних нітридів Ti, Hf та Si, який, в свою чергу, складається з двох прошарків зовнішнього і нижнього (рис. 5.2) [122]. Склад покриття вибирали на основі прототипу [125].

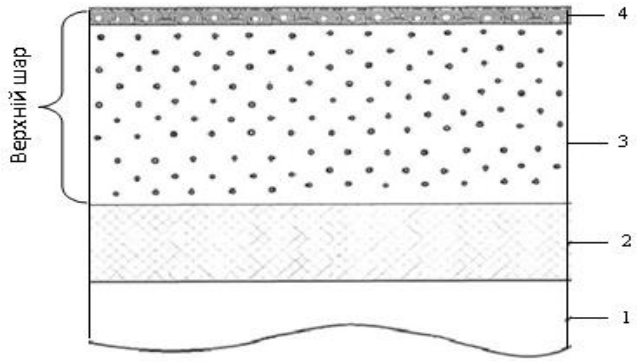


Рис. 5.2. Структура градієнтного покриття [122]: 1 – Інструментальна основа; 2 – Нижній шар; 3 – Нижній підшар верхнього шару; 4 – Зовнішній підшар верхнього шару

Товщина зовнішнього підшару верхнього шару 0,3 мкм та нижнього підшару верхнього шару 4,7 мкм були у такому співвідношенні компонентів (табл. 5.6) [122].

Таблиця 5.6

Співвідношеннях компонентів у зовнішньомі і нижньому підшарах у верхньому шарі

Типи підшарів у верхньому шарі	Титан, мас.%	Гафній, мас.%	Кремній, мас.%
Верхній (зовнішній)	65,0	30,0	5,0
Нижній	53,5	35,0	11,4

Завдяки градієнтної структури іонно – плазмового БГП досягається технічний результат у РІ зі сталі Р6М5. Тому, що відомо [180], для існування зовнішнього тертя (хороше припрацювання і зносостійкість) потрібне виконання умови – забезпечення правила градієнта зсувного опору, згідно з яким зсувний опір τ в зоні контакту твердих тіл повинен бути меншим, ніж на деякій глибині, тобто повинна дотримуватися умова $\delta\tau / \delta z > 0$.

Основною відмінністю між зовнішнім і внутрішнім тертям є локалізація процесів, які породжують зсувну силу в тонкому поверхневому шарі. В зв’язку з цим для забезпечення зовнішнього тертя необхідна наявність на поверхні твердого тіла ослабленого шару, який локалізує деформацію зсуву – фрикційний зв’язок, який утворюється повинен бути менш міцним ніж шари, яка лежать нижче (правило додатнього градієнта механічних властивостей). Зовнішнє тертя здійснюється і в тому випадку, коли виконується правило градієнту хоча б для одного тіла, яке має менший опір зсуву в порівнянні з іншим тілом [180].

За рахунок співвідношення компонентів у верхньому (зовнішньому) підшарі забезпечується менший зсувний опір завдяки нижчій твердості і

підвищеній пластичності порівняно з нижнім основнм підшаром. Зовнішній прошарок товщиною 0,3 мкм за час свого «життя» утворює специфічні вторинні структури з високою стійкістю до температурно – силових виливів контактного фрикційного процесу і створює оптимальні умови для роботи основного матеріалу покриття, виключаючи його тріщиноутворення та крихке руйнування при різанні [122].

В роботі проводили дослідження залишкових напружень та міцності зчеплення покриття з інструментальною основою (коефіцієнт відшарування $K_{вш}$, коефіцієнт тріщиностійкості $K_{тр}$). Результати випробувань фізико-механічних властивостей сталі Р6М5 із БГП в порівняяні з покриттям TiN наведенні у табл. 5.7 [122].

Таблиця 5.7

Фізико – механічні властивості сталі Р6М5 в залежності від виду обробки

Вид обробки сталі Р6М5			Границя міцності	$К_{вш}$	Мікротвердість,ГПа	$К_{тр}$
Типова технологія, нанесення покриття TiN			2,30	0,21	20,8	0,14
Запропонована технологія, БГП: Ti	Hf	Si	2,6	0,29	43	0,24
65,0 / 53,5	30,0 / 35,0	5,0 / 11,4				

Примітка: в чисельнику склад верхнього підшару, в знаменнику склад нижнього підшару.

5.3. Триботехнічні властивості сформованого градієнтного покриття.

Були проведені триботехнічні випробування на машині тертя СМЦ-2. Результати досліджень показали збільшення зносостійкості сталі Р6М5 із

запропонованим БГП. Результати випробувань на зносостійкість в залежності від навантаження та швидкості ковзання наведені на рис. 5.3-5.4.

Встановлено, що зносостійкість сталі Р6М5 з БГП в умовах тертя ковзання без змащування у 2,3-2,7 рази вища ніж сталі Р6М5 з покриттям TiN та у 4,5 рази більша ніж сталі Р6М5 без обробки.

Встановлено вплив навантаження та швидкості ковзання на величину зносу сталі Р6М5 з запропонованим БГП. Збільшення навантаження в 2 рази (при V = 1 м/с) приводить до підвищення зносу сталі у 1.3 рази, збільшення швидкості в 2 рази при навантаженні Р = 1 МПа збільшує знос у 1,3-1,5 рази. Дані результати досліджень показують те, що дане покриття дозволяє підвищити зносостійкість сталі та зменшити інтинсивність зношування. Його можливо ефективно використовувати на високих режимах різання.

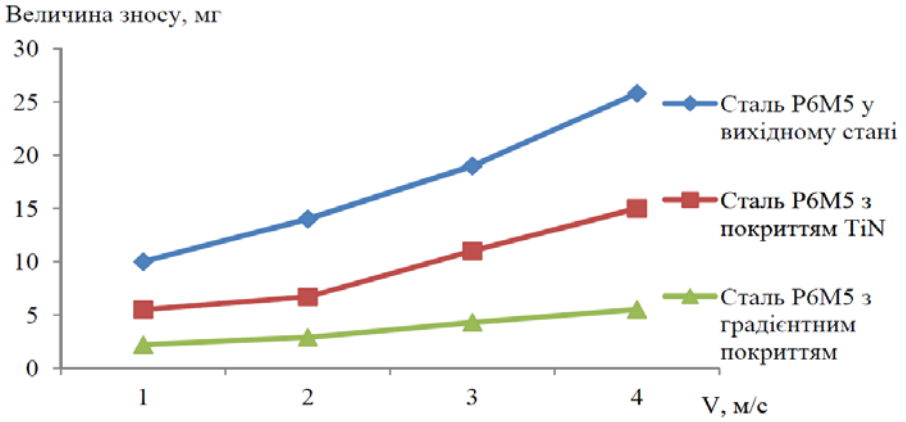


Рис. 5.3. Зносостійкість сталі Р6М5 в залежності від типу покриття і швидкості ковзання

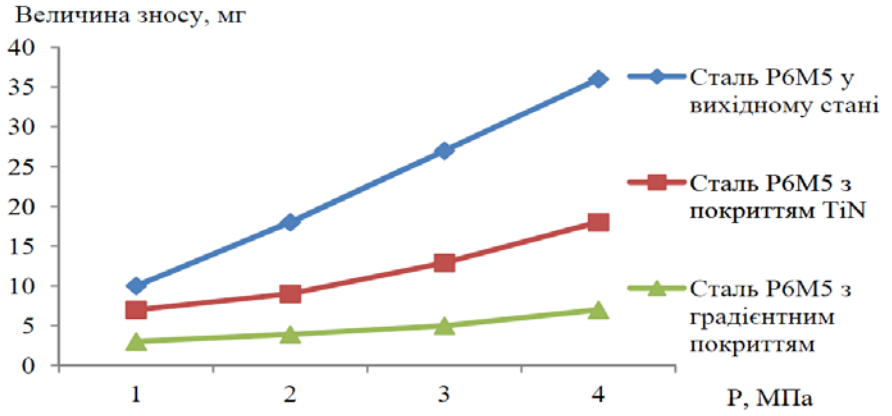


Рис. 5.4. Зносостійкість сталі Р6М5 в залежності від типу покриття навантаження

Також в даній роботі були проведені дослідження залежності велечини коефіцієнта тертя від швидкості ковзання та від навантаження (рис. 5.5-5.6). Результати досліджень показують, що сталь Р6М5 з БГП володіє меншим коефіцієнтом тертя порівняно з покриттям TiN та сталлю у вихідному стані.

Встановлено, що коефіцієнт тертя сталі Р6М5 з БГП в умовах тертя ковзання без змащування у 1,6-1,9 рази зменшився в порівнянні з покриттям TiN та у 2,3-2,5 рази ніж сталі Р6М5 без обробки.

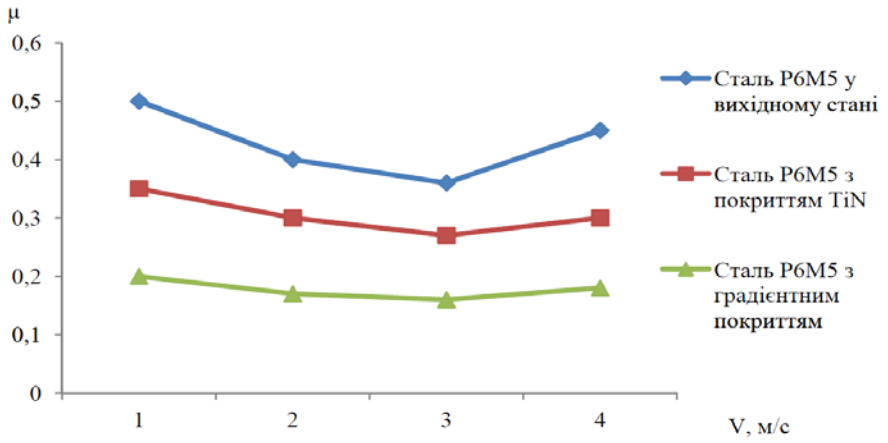


Рис. 5.5. Коефіцієнт тертя сталі Р6М5 в залежності від типу покриття і швидкості ковзання

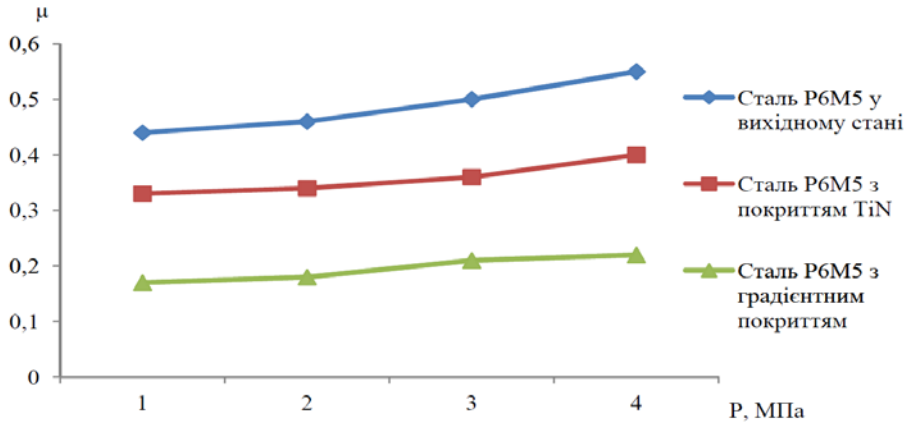


Рис. 5.6. Коефіцієнт тертя сталі Р6М5 в залежності від типу покриття і навантаження.

При збільшенні швидкості ковзання коефіцієнт тертя спочатку зменшується, потім збільшується, це свідчить про утвореннеа вторинних структур, які зі збільшенням температури у зоні контакту контртіла і зразку з

БГП спочатку інтенсивніше утворюються, йде інтенсивне окиснення (коефіцієнт тертя зменшується) а потім руйнуються при максимальних умовах випробувань (температура значно підвищується) [164]

Дослідження абразивної зносостійкості сталі Р6М5 з БГП. На поверхні тертя після випробувань спостерігаються рівномірні за глибиною «борозни» та вириви характерні для абразивного зношування. В якості абразиву виступають окремі, відокремлені частинки покриття. Зносотійкість в умовах абразивного зносу незакріпленими частинками зросла у рази впорінянні з покриттям TiN та зі сталлю у вихідному стані (рис. 5.7).

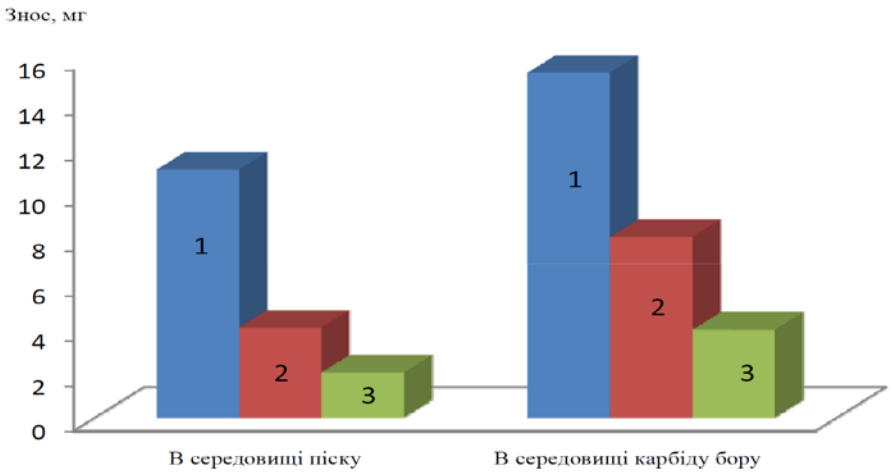


Рис. 5.7. Абразивна зносостійкість сталі Р6М5 в залежності від твердості абразиву: 1 – сталь Р6М5 у вихідному стані; 2 – сталь Р6М5 з іонно плазмовим покриттям TiN; 3 – БГП.

Дослідження стійкості РІ зі сталі Р6М5 з БГП. В результаті дослідження стійкості РІ зі сталі Р6М5 з БГП при точінні заготівок зі сталі ХВГ встановлено, що його стійкість вища, ніж стійкість пластин з покриттям TiN у 2,1 та у 3,4 рази в порівнянні з сталлю у вихідному стані (рис. 5.8).

РІ із БГП по стійкості переважає інструмент без покриття та з покриттям TiN. Його використання дозволить збільшити рентабельність використання РІ і, тим самим, підвищити економічну ефективність РІ та знизити ціноутворення готової продукції.

Розроблене БГП можливо рекомендувати для нанесення на РІ зі сталі

Р6М5, який працює в умовах тертя ковзання без змащування, при МО важкооброблюваних легованих сталей на високих швидкостях різання.

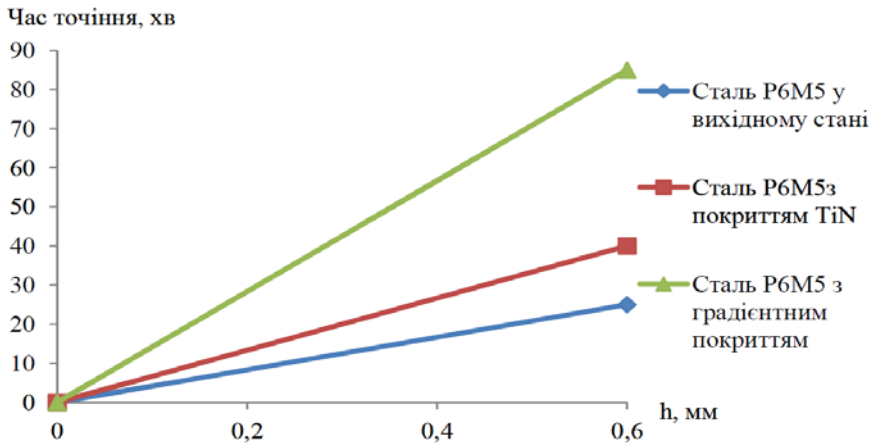


Рис. 5.8. Стійкість різальних пластин зі сталі Р6М5 з БГП покриттям взалежності від виду обробки

Проведені дослідження показали, що за рахунок утворення БГП змінної товщини на різальних крайках РІ зі сталі Р6М5 з необхідною структурою і властивостями, дозволить підвищити його експлуатаційні, фізико-механічні та триботехнічні характеристики, економію за рахунок використання імпортного інструменту без покриття і слідуючого нанесення на нього зносостійкого покриття на вітчизняному устаткуванні по розроблених технологічних процесах.

5.4. Побудова математичних моделей за результатами експериментальних досліджень.

За результатами експерименту (згідно алгоритму та методиці, що представлена в розділі 2, п. 2.10) проведено статистичний аналіз та побудовано регресійні моделі залежності критерію оптимізації, який характеризує величину вагового зносу (Y_1) та коефіцієнту тертя (Y_2) від конструктивних, технологічних та експлуатаційних факторів (табл. 5.2). Розрахунок моделей здійснювався за допомогою ППП ПРІАМ. В якості початкових даних

використовувалися план експерименту в натуральних координатах (табл. 5.5) та результати експериментальних досліджень, що проведені двічі при одних і тих же умовах (табл. 5.8, табл. 5.9).

Таблиця 5.8.

Величина зносу

№	Хімічний склад покриття	Величина зносу, мг	
		$Y_{1.1}$	$Y_{1.2}$
1	4	3,75	4,25
2	2	4,75	5,65
3	6	2,75	3,55
4	1	5,25	6,15
5	5	3,25	4,20
6	3	2,50	3,60
7	7	4,25	5,40
8	1	3,00	4,10
9	4	5,00	6,10
10	3	4,00	5,10
11	6	2,25	3,35
12	2	4,40	5,50
13	5	2,65	3,70
14	4	3,55	4,50
15	7	5,55	6,25
16	1	2,70	3,45

Таблиця 5.9.

Коефіцієнт тертя

№	Хімічний склад покриття	Коефіцієнт тертя	
		$Y_{2.1}$	$Y_{2.2}$
1	4	0,148	0,160
2	2	0,136	0,157

продовження таблиці

3	6	0,176	0,195
4	1	0,124	0,147
5	5	0,168	0,189
6	3	0,188	0,205
7	7	0,144	0,166
8	1	0,170	0,192
9	4	0,132	0,154
10	3	0,140	0,162
11	6	0,192	0,214
12	2	0,136	0,159
13	5	0,180	0,200
14	4	0,160	0,180
15	7	0,120	0,140
16	1	0,172	0,195

Внаслідок обробки результатів експерименту було отримано математичні моделі, що описують залежність величини зносу і коефіцієнту тертя від конструктивних, технологічних та експлуатаційних факторів.

$$Y_1=3{,}72601+1{,}72347X_4–0{,}0425083X_1^2X_4X_5^2 \quad (5.1)$$

$$Y_2=0{,}155762–0{,}037136X_4+0{,}01064483X_1^2X_4^2X_5^2 \quad (5.2)$$

де Y_1 – математична модель в кодованих значеннях для вагового зносу,

Y_2 – математична модель в кодованих значеннях для коефіцієнту тертя.

Формули переходу від кодованих значень факторів до натуральних:

$x_1=0{,}313725(X_1–3{,}8125)$;

$x_1^2=1{,}79184(X_1^2–0{,}0455298X_1–0{,}396386)$;

$x_4=0{,}740741(X_4–2{,}45)$;

$x_4^2=1{,}71634(X_4^2–0{,}079615X_4–0{,}348423)$;

$x_5=0{,}76555(X_5–2{,}49375)$;

$x_5^2=1{,}53668(X_5^2–0{,}025144X_5–0{,}350519)$.

Залежності, які отримали були перевірені на відтворюваність, адекватність та інформативність результатів за критеріями математичної статистики (п. 5.1.). Результати статистичного аналізу представлені в таблицях 5.10 та 5.11. Результати повторних досліджень, що проведені в однакових умовах, перевірялися на статистичну відтворюваність за критерієм Кохрена (G) (розділ 2, п. 2.10). Для всіх регресійних залежностей $G_{розр} < G_{табл}$ при $\alpha = 0,05$. Тому, ступінь розсіювання результатів за рядками матриці планування однакова, а результати відтворені. Перевірка гіпотези на адекватність отриманих моделей результатів експерименту проводилася з використанням F – критерію Фішера (розділ 2, п. 2.10). Для одержання моделей при прийнятому рівні значимості $\alpha = 0,05$ $F_{розр} < F_{табл}$, тому модель адекватно відображає результат експерименту. Оцінка якості отриманих математичних моделей проводилася шляхом визначення коефіцієнта множинної кореляції (розділ 2, п. 2.10). Коефіцієнт множинної кореляції R показує величину статистичного зв'язку по рівнянню множинної регресії Y_i і початковими результатами.

Таблиця 5.10

Статистична характеристики моделі величини зносу

Параметри статистичного аналізу	Значення параметрів для моделей
	Y_1
Аналіз адекватності моделі	
Залишкова дисперсія	0,00632608
Дисперсія відтворюваності	0,18625
Розрахункове значення F-критерію	176,571
Рівень значимості F-критерію для адекватності для ступенів свободи.	0,05 V1 = 2 V2 = 13
Табличне значення F-критерію для адекватності	3,80557

продовження таблиці

Стандартна помилка оцінки.	0,0795445
Стандартна помилка оцінки, скоректована з урахуванням ступенів свободи	0,0823364
Модель адекватна	
Аналіз інформативності моделі	
Частка розсіювання, що пояснюється моделлю	0,995091
Уведено регресорів	3
Коефіцієнт множинної кореляції	0,997542
Коефіцієнт множинної кореляції, скоректований з урахуванням ступенів свободи	0,997367
F відношення для R	1317,52
Рівень значимості F-критерію для інформативності для ступенів свободи	0,05 V1 = 2 V2 = 13
Табличне значення F-критерію для інформативності	3,80557
Критерії Бокса й Веца для інформативності.	16
Модель інформативна	

Таблиця 5.11.

Статистична характеристики моделі коефіцієнту тертя

Параметри статистичного аналізу	Значення параметрів для моделей
	Y_2
Аналіз адекватності моделі	
Залишкова дисперсія	0,0000136889

продовження таблиці

Дисперсія відтворюваності	0,00776875
Розрахункове значення F-критерію	39,2616
Рівень значимості F-критерію для адекватності для ступенів свободи.	0,05 V1 = 2 V2 = 13
Табличне значення F-критерію для адекватності	1,37408
Стандартна помилка оцінки.	0,00372471
Стандартна помилка оцінки, скоректована з урахуванням ступенів свободи	0,00385544
Модель адекватна	
Аналіз інформативності моделі	
Частка розсіювання, що пояснюється моделлю	0,977628
Уведено регресорів	3
Коефіцієнт множинної кореляції	0,988751
Коефіцієнт множинної кореляції, скоректований з урахуванням ступенів свободи	0,987942
F відношення для R	284,046
Рівень значимості F-критерію для інформативності для ступенів свободи	0,05 V1 = 2 V2 = 13
Табличне значення F-критерію для інформативності	3,80557
Критерії Бокса й Веца для інформативності.	7
Модель інформативна	

При підрахунках коефіцієнти множинної кореляції, в отриманих математичних моделях, статистично значимі, тобто $F_{розр} > F_{табл}$, при прийнятому рівні значимості. Отже, моделі інформативні і несуть корисну інформацію про процес, що моделюється.

Проводилось графічне дослідження впливу визначених факторів на критерії оптимізації, що характеризує ваговий знос та коефіцієнт тертя з іонно-плазмовим БГП. Воно виконувалося шляхом побудови сімейства графіків частинних рівнянь регресії для Y_1 – рис. 5.9…5.11, для Y_2 – рис. 5.12, 5.13.

Детальний аналіз впливу факторів на значення функції відгуку та визначити те значення факторів, яке на протязі всього часу впливу здійснює найбільший чи найменший ефект дозволяє провести візуальний аналіз графіків.

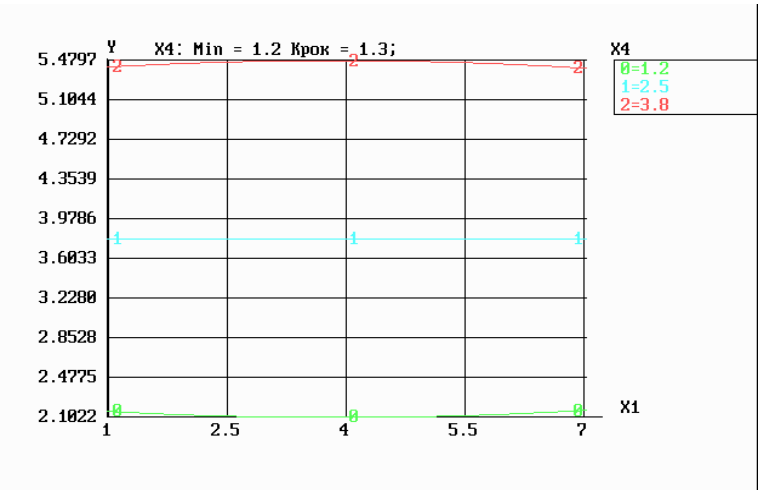


Рис. 5.9. Графіки частинних рівнянь регресії $Y_1 = f(X_1, X_4)$ при X_5=1,2 МПа.

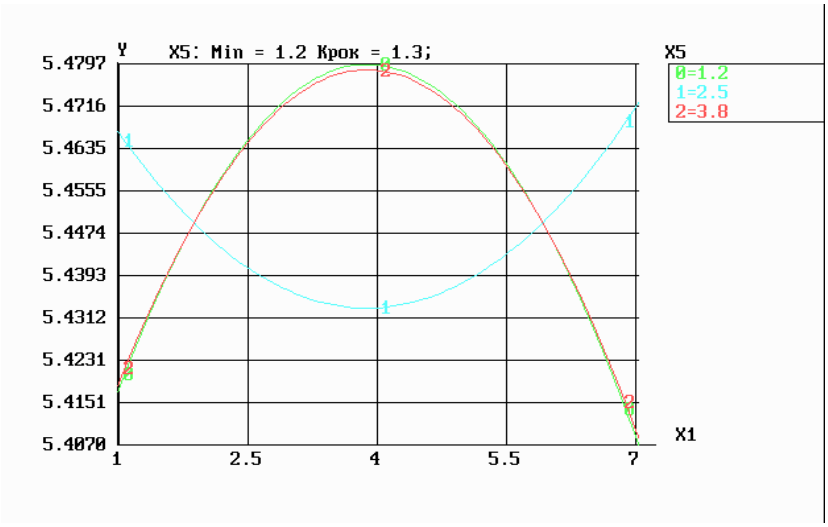


Рис. 5.10. Графіки частинних рівнянь регресії $Y_1 = f(X_1, X_5)$ при X_4=3,8 м/с.

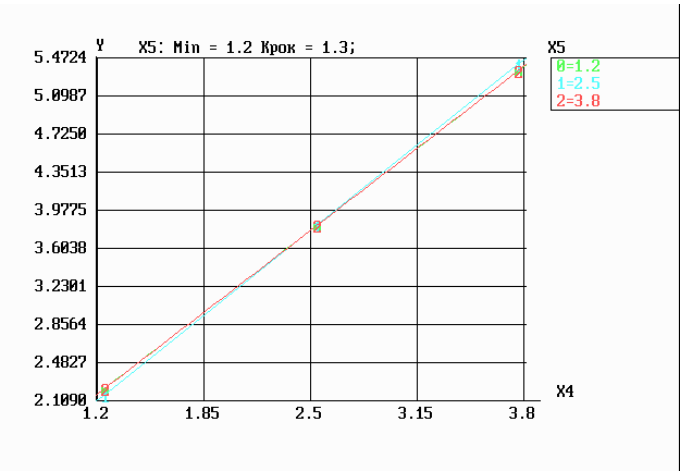


Рис. 5.11. Графіки частинних рівнянь регресії $Y_1 = f(X_4, X_5)$ при X_1=7.

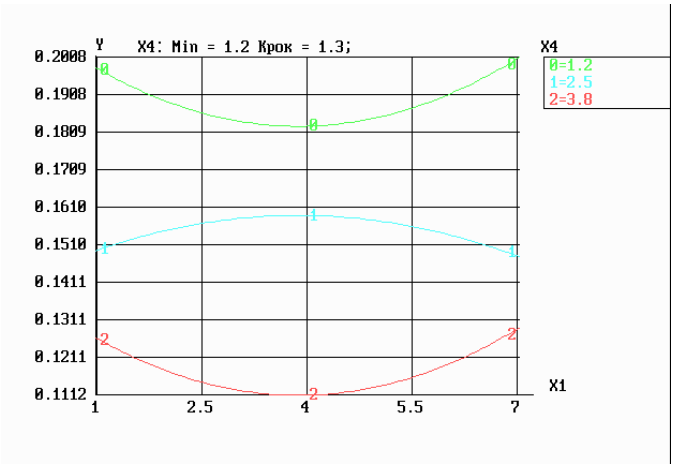


Рис. 5.12. Графіки частинних рівнянь регресії $Y_2 = f(X_1, X_4)$ при X_5=1,2 МПа.

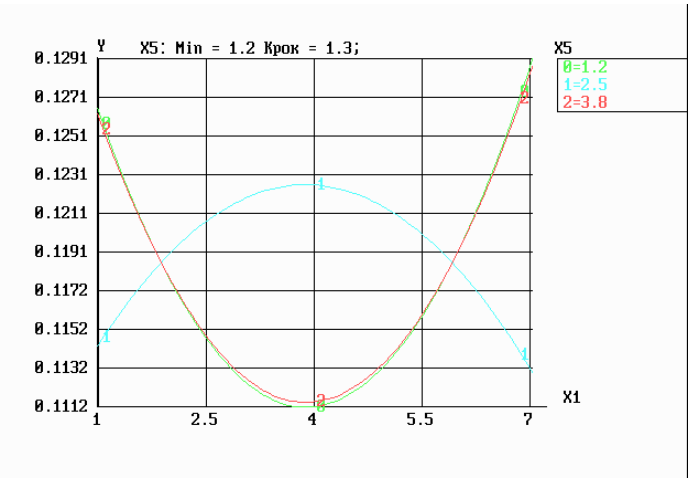


Рис. 5.13. Графіки частинних рівнянь регресії $Y_2 = f(X_1, X_5)$ при X_4=3,8 м/с.

Наочне уявлення про геометричний образ функцій відгуку можна одержати побудовою відповідних геометричних поверхонь (на основі отриманих результатів), які представлено для Y_1 – рис. 5.14…5.16, для Y_2 – рис. 5.17…5.19.

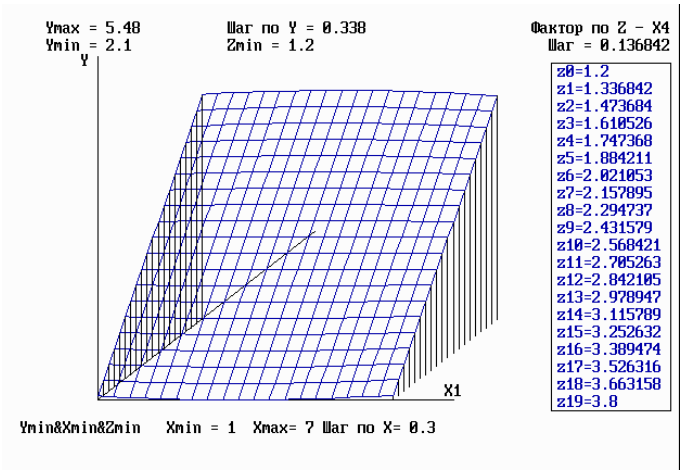


Рис. 5.14. Графік дослідження поверхні відгуку $Y_1 = f(X_1, X_4)$ в тривимірному просторі при X_5=1,2 МПа.

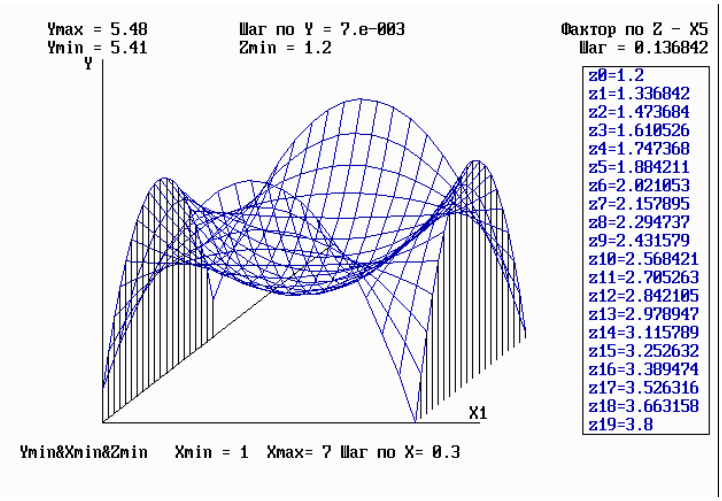


Рис. 5.15. Графік дослідження поверхні відгуку $Y_1 = f(X_1, X_5)$ в тривимірному просторі при X_4=3,8 МПа.

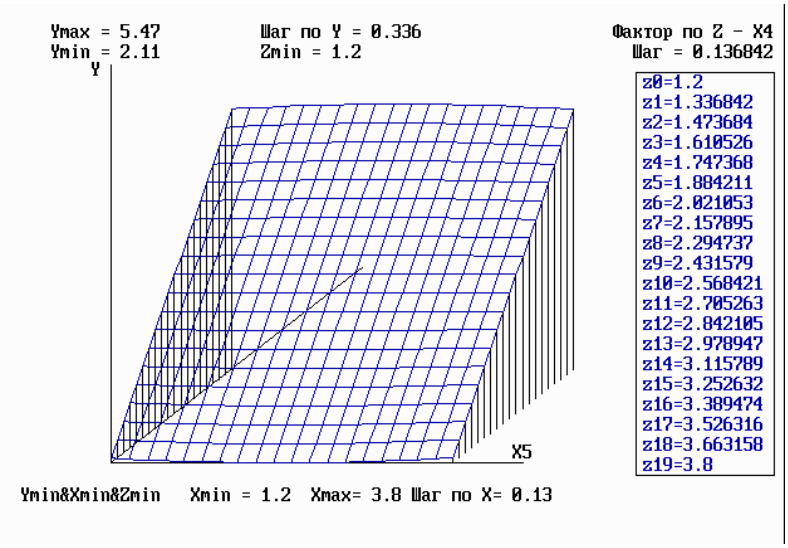


Рис. 5.16. Графік дослідження поверхні відгуку $Y_1 = f(X_4, X_5)$ в тривимірному просторі при X_1=7.

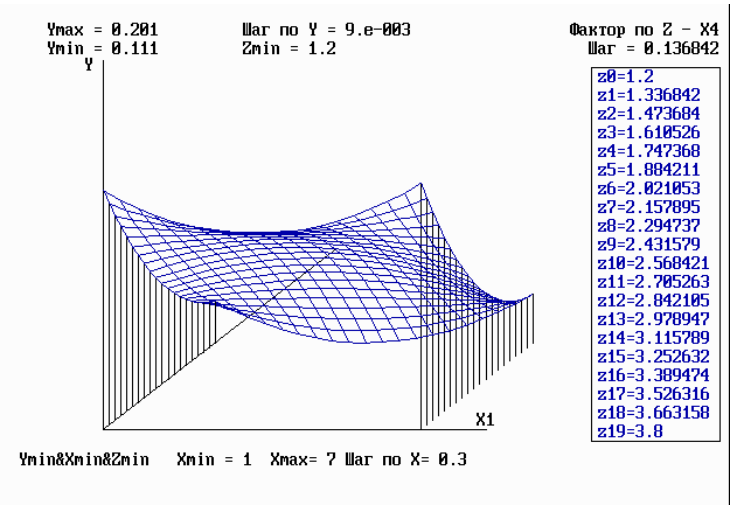


Рис. 5.17. Графік дослідження поверхні відгуку $Y_2 = f(X_1, X_4)$ в тривимірному просторі при X_5=1,2 МПа.

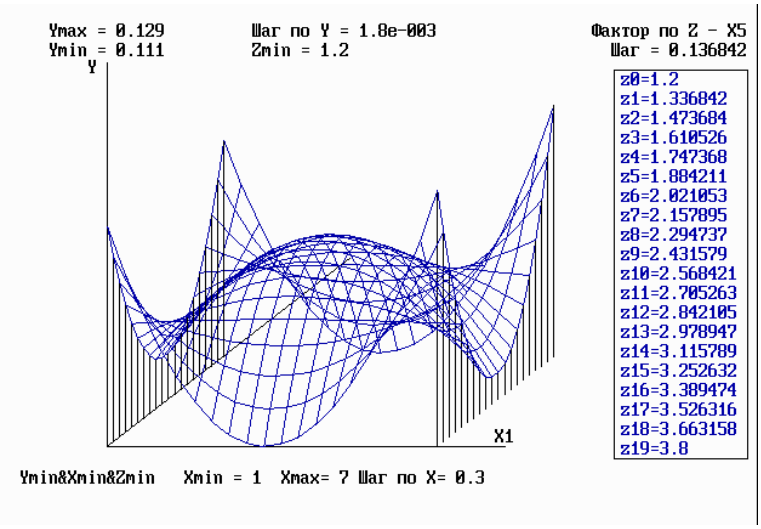


Рис. 5.18. Графік дослідження поверхні відгуку $Y_2 = f(X_1, X_5)$ в тривимірному просторі при X_4=3,8 МПа.

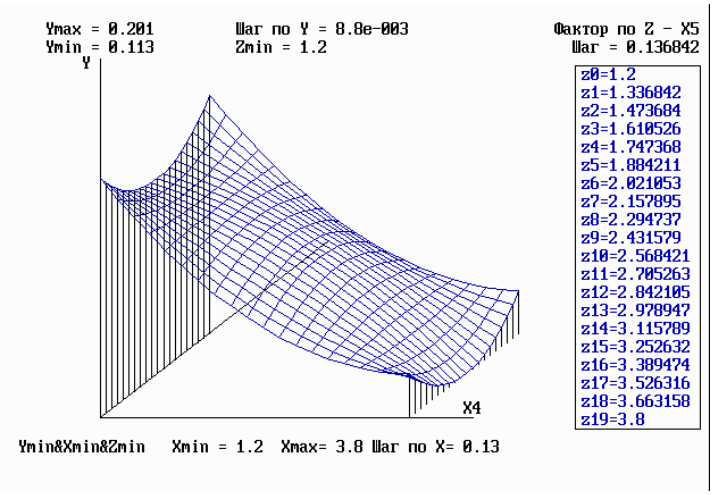


Рис. 5.19. Графік дослідження поверхні відгуку $Y_2 = f(X_4, X_5)$ в тривимірному просторі при X_1=7.

Внаслідок одержаних результатів статистичного аналізу можливо зробити висновок, що регресійні залежності адекватні та інформативні, результати відтворені, коефіцієнти b_0 і b_i статистично значимі. Усе це говорить про те, що регресійні залежності адекватно описують процес і їх можна використовувати для аналізу й оптимізації технологічного процесу нанесення іонно-плазмових покриттів.

5.5. Визначення оптимальних параметрів удосконаленого технологічного процесу нанесення іонно-плазмових багатошарових градієнтних покриттів.

Для вирішенні оптимізаційної задачі вибрали такі критерії оптимізації, які характеризують об’єкт дослідження: величина зносу (Y_1) та коефіцієнт тертя (Y_2). Унаслідок цього постає проблема вибору важливості цих критеріїв і призначення їм вагових коефіцієнтів. Це пов’язано з тим, що згідно з реальною постановкою задачі оптимізації вплив конкретного критерію на те оптимальне значення режиму технологічного процесу нанесення градієнтних іонно-плазмових зносостійких покриттів може бути різним (більш сильним або менш). Крім того, покращуючи один критерій можна неминуче погіршити значення інших, тобто вони є нерівнозначними. Тому і виникає задача визначення деякої компромісної точки, яка в рівній мірі може задовольняти всім вимогам (компроміс за Парето).

Для кожного досліду експериментальних випробувань (табл. 5.8, 5.9), за методикою планування експерименту (розділ 2, п. 2.10), проводилось визначення узагальненого критерію, яке полягало у використанні системи експертних оцінок (експерти із Національного авіаційного університету), згідно якої кожному критерію оптимізації встановлено “рейтинг”. За результатами всіх відповідей експертів виконується розрахунок рангів та вагових коефіцієнтів. Результати обчислень представлено в табл. 5.12.

Таблиця 5.12

Значення рангу критеріїв оптимізації

Експерти	Критерії оптимізації	
	Y_1	Y_2
Експерт 1	1	2
Експерт 2	2	1
Експерт 3	1	2
Експерт 4	1	2
Експерт 5	1	3
Експерт 6	2	3
Експерт 7	1	3
Ранг P_i	1,29	2,26
Ваговий коефіцієнт K_i	1	0,756

Таким чином, на основі результатів експериментальних досліджень та отриманих математичних моделей (5.1, 5.2) проведено визначення оптимальних параметрів технологічного процесу нанесення зносостійких багатошарових градієнтних іонно-плазмових покриттів.

Результати розрахунку ефективності узагальненого критерію якості наведено в табл. 5.13.

Таблиця 5.13.

Результати багатокритеріальної оптимізації

№	Номер досліду	Коефіцієнт ефективності ($y_{ефект}$)
1	16	0,918359851
2	13	0,911682199
3	3	0,911239973
4	6	0,907167974

продовження таблиці

5	11	0,905263158
6	8	0,900810994
7	5	0,88259115
8	14	0,860984946
9	1	0,847035439
10	10	0,82480719
11	7	0,799548252
12	12	0,786166312
13	2	0,751670173
14	9	0,727362988
15	4	0,703030362
16	15	0,673384705

Як видно з таблиці, найбільше значення ефективності критерію якості (найменше значення узагальненого критерію) відповідає 16 досліду (табл. 5.5), а реалізовані параметри нанесення багатошарового градієнтного іонно-плазмового зносостійкого покриття і є оптимальними. Це значення узагальненого критерію якості є, по суті, відстанню точки факторного простору, що відповідає 16 досліду, до гіпотетичної найкращої точки.

Таким чином, у результаті проведеної з використанням одержаних математичних моделей багатокритеріальної оптимізації (компроміс за Парето), було знайдено найоптимальніше поєднання рівнів конструктивних та технологічних факторів, що впливають на критерії оптимізації (зовнішнього підшару верхнього шару): тип покриття (X_1) – Ti (65%) Hf (30%) Si (5%), товщина покриття (X_2) – $3{,}1 \cdot 10^{-6}$ м, тиск реакційного газу (X_3) – 0,354 Па.

Перевірка достовірності отриманих результатів проводилася шляхом нанесення зносостійкого градієнтного іонно-плазмового покриття за вказаними режимами, що отримані в результаті багатокритеріальної оптимізації й

перевірки значень вагового зносу (Y_1) та коефіцієнту тертя (Y_2) (критеріїв оптимізації). Відхилення складають 3...7 %, що свідчить про правильність отриманих результатів досліджень.

5.6. Механізм зносу сформованого градієнтного покриття різального інструменту

Результати досліджень фізико-механічних та триботехнічних характеристик розробленого БГП (Ti, Hf, Si) інструментальної матриці підтверджують, що механізм зносу РІ доцільно розглядати з енергетичних уявлень руйнування матеріалів [89, 181-183].

Оскільки взаємодія РІ і оброблюваного матеріалу супроводжується високою швидкістю різання, яка викликає значні теплові і механічні навантаження, то можлива реалізація процесу пружно-пластичної деформації сформованих поверхневих шарів, який через вплив дотичних напружень в умовах зовнішнього тертя обумовлений утворенням, переміщенням та переповзанням дислокацій.

Зниження величини зносу РІ з градієнтним покриттям (рис. 5.3-5.4) і підвищення опірності зрізу макрооб’ємів РІ відбувається за рахунок сформованих поверхневих шарів іонно-плазмових БГП, які володіють високими дисипативними властивостями, більшою енергоємністю поверхневих структур, підвищеним опором до пластичних деформацій і розвитку мікротріщин.

Отримана структура поверхневих шарів іонно-плазмових БГП характеризується високою щільністю дислокацій, що притаманна поверхням зносостійких покриттів із структурною пристосовуваністю, тобто за рахунок підбору хімічних елементів (Ti, Hf, Si) отримуються вторинні структури з необхідними властивостями, а хімічний склад та багатошаровість покриття забезпечує міцний зв’язок з основним матеріалом РІ. Отримана дислокаційна структура поверхневих шарів іонно-плазмових БГП не схильна до

температурної деградації, яка визначає критичні умови експлуатації РІ. Також можна констатувати, що деградація дислокаційної структури поверхневих шарів іонно-плазмових БГП, в свою чергу, не відбувається, оскільки градієнтне покриття інструментальної матриці на основі Ti-Hf-Si-N не піддається процесу рекристалізації, якому властиві процеси самодифузії. Це досягається завдяки здійсненому підбору хімічних елементів з відповідними властивостями БГП, що наносяться способом вакуумно-дугового осадження та їх взаємодією.

Крім того, зносостійкість і, як наслідок довговічність та працездатність РІ в значній мірі пов'язана з втратою формостійкості, яка визначається співвідношенням дійсних твердостей робочої поверхні РІ та оброблюваного матеріалу для реального контактного процесу [12] та, які залежать від величини температурного режиму. У нашому випадку, для РІ з іонно-плазмовими БГП величина твердості має градієнтне значення за глибиною сформованих шарів, причому твердість зовнішнього підшару верхнього шару (рис. 5.2) нижча від наступних шарів. Тобто в процесі взаємодії РІ та оброблюваного матеріалу не відбувається різкого підвищення температури, яка б впливала на величини твердості зазначених елементів.

Утворення вторинних структур на поверхневих шарах сформованих іонно-плазмових БГП РІ і їх розвиток на робочій поверхні при обробці з точки зору структурно-енергетичного підходу можна розглядати як процес формування дрібнодисперсних структур з підвищеною величиною хімічного потенціалу. Наявність вторинних структур на поверхнях тертя та їх зміна при різанні дозволяє звести процес припрацювання до мінімуму і, тим самим, звести механізм зносу РІ з іонно-плазмовими БГП до втомного руйнування поверхневих шарів або до процесу саморуйнування при абразивному зношуванні.

Висока зносостійкість і стійкість РІ зі сталі Р6М5 на поверхні тертя якого утворюються вториннні структури з сформованим іонно-плазмовим БГП забезпечується за рахунок усунення початкового несталого процесу зношування і більш низькій швидкості зношування усталеного періоду. При

різанні відбувається постійне формування вторинних структур чи їх оновлення, що дозволяє забезпечити ефект пристосовуваності. Явище структурної пристосовуваності дозволяє забезпечити необхідні триботехнічні показники і поверхневу міцність РІ, що для сформованих іонно-плазмових БГП на основі Ti-Hf-Si-N дозволяє на робочій поверхні РІ при взаємодії з оброблюваним матеріалом змінити або відтворити структуру з високою дисипативною здатністю і більшою енергоємністю.

Механізм зносу робочої поверхні РІ із сформованими іонно-плазмовими БГП на основі Ti-Hf-Si-N можна представити у вигляді декількох етапів.

На початковому етапі експлуатації РІ в результаті взаємодії з оброблюваним матеріалом відбувається накопичення дефектів (дислокацій) у зовнішньому підшарі верхнього шару БГП з реалізацією процесу втомної міцності з протіканням мікроруйнівних процесів із наступним зношуванням шару сформованих чи утворених вторинних структур, які виступають захисним покриттям. Причиною такого є реалізація втомного зношування при механічній взаємодії робочої поверхні РІ з оброблюваним матеріалом. Крім того, на інтенсивність зношування РІ з БГП в деякій мірі впливає окисна дія повітря (з підвищенням температури). На відміну від РІ без покриття, для якого характерним є зміна механізму зносу через інтенсифікацію при високих швидкостях (температурах) хімічної взаємодії з оброблюваним матеріалом і елементами навколишнього середовища і, як наслідок, відбувається реалізація процесу рідинного тертя на контактуючих поверхнях [184]. Для РІ з БГП зміна швидкості різання сприяє зниженню складової сили різання P_z, тим самим, зменшує вплив на складову P_y, тобто не відбувається зміни механізму зносу зовнішнього підшару верхнього шару БГП РІ. Якщо припустити, що механізм зносу змінюється при руйнуванні зовнішнього підшару верхнього шару БГП РІ, то в цьому випадку буде проявлятись така ж аналогічна картина з підвищенням швидкості різання, тобто зниження P_z та P_y.

При збільшенні режимів обробки (тиск, швидкість) у системі «РІ –

оброблюваний матеріал», то можна спостерігати практично постійну (лінійну) величину зношування БГП на основі Ti-Hf-Si-N, тобто з підвищенням температури у контакті підвищується зносостійкість сформованих покриттів. Саме підвищення температури у системі «РІ – оброблюваний матеріал» призводить до зміни умов реалізації та протікання процесів в контактній зоні через зміну структури зовнішнього підшару верхнього шару БГП РІ, отриманого способом вакуумно-дугового осадження. Як зазначалось раніше, така зміна характеризується утворенням вторинних структур, які допомагають реалізовувати ефект пристосовуваності.

На відміну від процесів, що протікають у системі «РІ – оброблюваний матеріал» при температурі навколишнього середовища, з підвищенням режимів різання реалізується процес високотемпературного тертя, що призводить до інтенсифікації окислення і подальшого формування чи відновлення зруйнованих вторинних структур. Зміна фазового стану в активних шарах протікає відповідно заданим температурно-силовим умовам і залежить від активності дифузійних процесів. У результаті описаних ефектів можливий перерозподіл елементів структурних складових БГП РІ, розчинення дрібнодисперсних включень, вирівнювання ступеня гетерогенності за глибиною активного шару і створення на робочій поверхні шарів (вторинних структур), які насичуються в процесі різання і тертя хімічними елементами з навколишнього середовища. Необхідно відзначити, що таке утворення (формування чи відновлення) вторинних структур можливе до певного рівня швидкісно-силового навантаження, а сприятливий вплив трибохімічних процесів на антифрикційні властивості сформованих покриттів має місце тільки до певного рівня режимів тертя у системі «РІ – оброблюваний матеріал». Сам процес зношування напряму не може бути пов’язаний з будь-якою властивістю вторинних структур. При цьому, для забезпечення існування стійких вторинних структур необхідно вдосконалювати цілий комплекс характеристик, як міцність, крихкість, твердість, міцність зчеплення з поверхнею зовнішнього і нижнього підшарів верхнього шару БГП РІ. У [185, 186] відзначено про

існуючий взаємозв’язок механічних властивостей матеріалів, зокрема твердості, з температурою на поверхні. Приведені результати досліджень вказують, що трибохімічний процес окислення є важливим і сприятливим процесом для умов високотемпературного тертя, а його протікання відбувається далеко від рівноважного стану. При цьому, виділяються деякі особливості такого процесу в порівнянні із процесом звичайного ізотермічного окислення.

В результаті трибохімічного окислення сформованих БГП РІ на основі Ti-Hf-Si-N відбувається структурна адаптація (пристосовуваність) поверхневих шарів до умов високотемпературного тертя з утворенням вторинних структур. Дана структурна пристосовуваність сформованих БГП є процесом, який заснований на явищі самоорганізації [186], у результаті якого відбувається підвищення зносостійкості. Окисні сполуки на металевій основі, у вигляді вторинних структур, які утворюються в процесі різання, діють як захисний екран від зношування нанесеного БГП на РІ, що узгоджується з викладками наукових робіт [187, 188].

Окремо необхідно зазначити, що у сформованих БГП РІ на основі Ti-Hf-Si-N визначальною властивістю є адгезійна міцність, яка є визначальною для процесів когезійного руйнування та пластичного стирання при відповідних режимах різання та стану робочої поверхні РІ.

Даний етап процесу зношування закінчується зникненням вторинних структур (захисного шару) зовнішнього підшару верхнього шару БГП РІ за причиною відсутності протікання на робочій поверхні трибохімічних реакцій; дисипативні процеси не протікають, а енергоємність вторинних структур сягає пікового значення, що призводить до перенасичення дефектами (дислокаціями) та їх остаточного руйнування.

На даному етапі процесу зношування РІ з іонно-плазмовим БГП, з теоретичної точки зору, для описання механізму зносу сформованих ультрадрібнодисперсних покриттів можна використати відомі дислокаційні моделі зародження та розвитку мікротріщин [189, 190]. Дислокації мають властивість високої рухливості, а під дією зовнішніх швидкісно-силових

навантажень вони здатні до спрямованого переміщення, тобто до досягнення процесу самоорганізації. Перешкодами для руху дислокацій виступають межі зерен, субзерен, двійників, межфазові межі, дисперсні включення зміцнюючих елементів БГП РІ на основі Ti-Hf-Si чи їх сполук та неметалеві включення – нітриди, оксиди тощо.

Дислокації взаємодіють між собою та з жорсткими перешкодами, внаслідок чого виникають значні місцеві концентрації напружень, які при відсутності релаксаційних процесів можуть досягати рівня теоретичної міцності кристалічної ґратки і викликати утворення мікротріщин з розмірами в декілька міжатомних відстаней. Відомі моделі утворення дислокаційних тріщин засновані на уявленнях про скупчення дислокацій перед перешкодами [191], наприклад, дислокаційна модель Зинера-Стро чи модель Екоборі.

При цьому мікротріщини починають зароджуватися при високій концентрації розтягуючих напружень у скупченні дислокацій перед перешкодами – межі зерен нітридів чи оксидів. Під час руху дислокацій з поступовим їх накопиченням відбувається стадія процесу самоорганізації, а в поверхневому шарі іонно-плазмових БГП РІ утворюється нова структура, яка, в свою чергу, буде викликати деградацію структури покриття на основі Ti-Hf-Si-N, а в кінцевому випадку призведе до зміщення мікротріщини, подальшого її переходу до руху з постійним зростанням і початку нестабільного руйнування сформованого покриття на РІ. При цьому найкращий шлях для поширення мікротріщини в ультрадрібнодисперсних покриттях є міжфазні межі. Утворення мезо- чи наноструктурних ансамблів в ультрадрібнодисперсних покриттях на основі Ti-Hf-Si-N призводить до сповільнення процесів самоорганізації дислокацій, що може сприяти підвищенню тріщиностійкості матеріалу через розсіювання енергії при руйнуванні.

На наступному етапі процесу зношування РІ з БГП в системі «РІ – оброблюваний матеріал» беруть безпосередню участь лише зазначені матеріали, при цьому протікає механізм зносу зовнішнього підшару верхнього шару БГП РІ (рис. 5.2) з пластичною деформацією та наступним руйнуванням останнього.

Внаслідок реалізація пластичної деформації і наступного руйнування матеріалу відповідно до дислокаційної теорії є функція наступних параметрів [192]:

$$\sigma_т, K_{1C} = f\left(\sigma_п, \sigma_д, \sigma_р, \sigma_ф, \sigma_з\right),$$

де $\sigma_п$ – величина напруження Пайперса-Набарро (напруження тертя кристалічної ґратки); $\sigma_д$ – величина зміцнення через підвищення кількості дефектів ґратки (вакансій, дислокацій); $\sigma_р$ – величина зміцнення за допомогою розчинених атомів; $\sigma_ф$ – величина зміцнення, що досягається створенням дисперсійних фаз, наявних або спеціально створених у структурі градієнтного покриття; $\sigma_з$ – величина зміцнення за допомогою мікро- та наноструктурних бар'єрів на шляху переміщення чи руху дислокацій, що представлені межами зерен, межами декількох фаз тощо.

Якщо відбувається збільшення величини напруження тертя кристалічної ґратки матриці $\sigma_п$ відбувається зростання пластичної деформації $\sigma_т$ з одночасним зниженням критичного напруження руйнування K_{1C}. Напруження тертя кристалічної ґратки $\sigma_п$ має сильну залежність від типу зв'язку елементів матриці покриття, сформованої на основі Ti-Hf-Si-N з підвищенням посилення міжатомного зв'язку. Реалізація гальмування руху дислокацій у сформованому БГП у випадку зниження температури більш ефективно відбувається за допомогою рельєфу Пайперса, що було враховано при оптимізації хімічного складу запропонованого покриття під час оцінки впливу напруження тертя кристалічної ґратки $\sigma_п$ на їх міцність. Також для підвищення фізико-механічних властивостей БГП в структурі матеріалу передбачено утворення дисперсійних зміцнюючих фаз, що визначається параметром $\sigma_ф$ та з формуванням зерен нанодисперсних розмірів у багатофазній структурі матеріалу градієнтного

покриття, що визначається параметром $\sigma_з$.

Як відомо [193], основними причинами руйнування покриттів із стандартною структурою з розмірами зерен понад 1 мкм, є формування тріщин, внаслідок виникнення значної концентрації дислокацій. У наноструктурованих покриттів з розмірами зерен менше 100 нм переважною причиною руйнування виступають процеси, що протікають на межах між зернами. Це пов'язано з порівняно меншою кількістю атомів у зернах у порівнянні з кількістю, що знаходяться на їх межах [194, 195]. Зміцнення меж зерен приводить до трансформації взаємодії між зернами, оскільки сповільнюється рух дислокацій та їх генерація, а також сповільнюється або припиняється рух тріщин.

В матеріалі сформованого покриття на основі Ti-Hf-Si-N виникнення дислокацій в нанорозмірних зернах практично не відбувається через повне їх сповільнення на межах зерен, а самі межі виконують вирішальну роль в деформації і руйнуванні БГП РІ при взаємодії з оброблюваним матеріалом. Такий процес зношування БГП РІ може бути пояснений дислокаційною теорію повзучості. Оскільки межі зерен будуть надійним стопором для руху дислокацій, то, у цьому випадку, при зменшенні розмірів самих зерен підвищується міцність та твердість матеріалів покриття з одночасним зростанням зерномежевої повзучості [195].

Згідно з вищенаведеною дислокаційною теорію при дуже малих розмірах зерен матеріал покриття стає пластичним. Це накладає певні обмеження на зменшення розміру зерен з метою досягнення максимальної твердості. Але БГП на основі Ti-Hf-Si-N нанесені способом вакуумно-дугового осадження на РІ володіють нижчою твердістю і підвищеною пластичністю для забезпечення меншого зсувного опору. При використанні зазначених іонно-плазмових БГП з нанозерновою структурою для РІ забезпечується збалансованість достатньо високої твердості і зносостійкості кожного з шарів покриття в поєднанні з достатньою тріщиностійкістю і опором до втомного руйнування матеріалів.

Не дивлячись на вищенаведене, механізм зносу зовнішнього підшару

верхнього шару БГП РІ (рис. 5.2) при подальшій взаємодії з оброблюваним матеріалом відбувається при процесах 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, але трибохімічні процеси практично не протікають. Рідка фаза не з'являється але інтенсивність зношування дещо підвищується.

Після зносу зовнішнього підшару верхнього шару БГП РІ, на новому етапі, у контактну взаємодію з оброблюваним матеріалом вступає нижній підшар верхнього шару БГП (рис. 5.2). Механізм зносу аналогічний описаному вище, тобто відбувається втомне зношування та/або з вириванням абразивних часток з даного підшару БГП та/або адгезійним руйнуванням. Одночасно відбувається хімічна взаємодія між РІ і оброблюваним матеріалом з насиченням елементами з навколишнього середовища практично без протікання трибохімічних процесів. Рідка фаза в системі «РІ – оброблюваний матеріал» не з'являється, а інтенсивність зношування практично не змінюється.

На останніх вищезазначених етапах процесу зношування іонно-плазмових БГП РІ 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 (рис. 5.2) з одночасним зниженням інтенсивності зношування. У цих випадках механізм зношування, в основному, буде визначатись фізико-механічними властивостями елементів Ti-Hf-Si-N та їх сполук, що утворюються в сформованих покриттях при вакуумно-дуговому осадженні та пов'язаний з ним абразивне та/або адгезійне руйнування з мінімізацією протікання трибохімічних процесів.

Такий самий механізм зносу присутній і у нижньому шарі БГП РІ, що характерний останньому етапу. При цьому знос нижнього шару БГП до основи (рис. 5.2) зазнає втомного зношування та/або з вириванням абразивних часток із зазначеного шару. У даному випадку на контактній поверхні РІ при взаємодії з

оброблюваним матеріалом може з’явитись рідка фаза, а інтенсивність зношування різко зрости.

Таким чином, 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 в присутності пластичного деформування, втомного, абразивного та адгезійного руйнування.

5.7. Розробка триботехнології комплексного підвищення експлуатаційних характеристик сталі Р6М5 при нанесенні іонно-плазмового покриття TiN

Як вже зазначалось, нанесення іонно-плазмових покриттів на РІ зі сталі Р6М5 дозволить підвищити його працездатність, зносостійкість, економію за рахунок збільшення стійкості, проте існуюча технологія нанесення іонно – плазмових покриттів на РІ зі сталі Р6М5 [121] не може вважатись оптимальною, оскільки не розрахована на додатковий нагрів біля 600 °С, необхідний для отримання більш якісних покриттів, і є по суті першою причиною перевідпуску РІ, що призводить до невиправного браку – отримується неякісне покриття (пористість, відшаровування) та до високіих витрат електроенергії при виробництві РІ.

Виготовлення РІ із зносостійким покриттям за відомим способом включає нанесення покриттів після повного циклу термічної і наступної чистової МО (шліфування) [121].

Типова термічна обробка РІ із швидкорізальних сталей включає гартування від температур порядку 1240 – 1360 °С в середовище (температура 450 °С) з наступним охолодженням на повітрі та наступний триразовий відпуск. При цьому інструмент отримує необхідну твердість 63 – 65 HRC. Проте, триразовий відпуск інструменту із швидкорізальних сталей знижує одну із найважливіших експлуатаційних характеристик – теплостійкість, тобто

стійкість проти відпуску, здатність зберігати мартенситну структуру. Вона залежить від ступеня насиченості аустеніту легуючими елементами в процесі нагрівання при гартуванні. Теплостійкість зазвичай оцінюють за максимальною температурою відпуску, після якого твердість ще не менша, ніж 60 HRC [123, 196].

Твердість швидкорізальних сталей після гартування порівняно невелика: 59 – 61 HRC, тому, що в структурі, крім мартенситу і первинних карбідів, знаходиться велика кількість залишкового аустеніту (більше 30 %). Високу твердість (63 – 65 HRC) швидкорізальна сталь отримує внаслідок триразового відпуску, під час якого аустеніт перетворення в мартенсит, при цьому кількість аустеніту знижується до 3 – 5 %. У процесі витримування при відпуску з мартенситу і залишкового аустеніту виділяються дисперсні карбіди. Мартенсит, утворений із збідненого легуючими елементами аустеніту підвищує твердість, але знижує теплостійкість. При стандартних температурах відпуску (540 – 560 °С) процес не завершується при одноразовій операції, тому у виробничій практиці використовують триразовий відпуск, щоб отримати задані значення твердості, при цьому після кожного відпуску потрібне охолодження інструменту [123, 196].

Запропонований нами спосіб нанесення іонно-плазмового покриття [123] полягає в ДЛО в режимі оплавлення поверхні невідпущеного інструменту з наступним відпуском загартованого інструменту при підвищених температурах 560 – 580 °С і суміщенням його з операцією нанесення покриттів, що забезпечує підвищення стійкості інструменту за рахунок покращення комплексу характеристик сталі, яка є основою під тонким іонно – плазмовим покриттям, а саме, підвищується теплостійкість і твердість сталі (табл. 5.3), дискретна структура поверхні створює благоприємний НДС щодо зниження напружень при терті, при цьому підвищується теплостійкість швидкорізальної 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 [123].

Реалізація даного способу полягає у наступному [123]: спершу перед нанесенням іонно-плазмового покриття невідпущений інструмент піддають ДЛО зі щільністю зміцнених ділянок 70-75 % від загальної площі поверхні. Після чистової МО (шліфування) здійснюють нанесення зносостійких покриттів (при температурах 560 – 580 °С, які відповідають температурам відпуску) на установці типу «Булат» за відомою технологією [121], при цьому процес нанесення покриття суміщують з одноразовим відпуском.

Фізико-механічні властивості різальних пластин зі сталі Р6М5 покриттям TiN нанесеним за типовою та запропонованою технологіями наведені в табл. 5.14 [123].

Таблиця 5.14.

Фізико – механічні властивості сталі Р6М5 в залежності від виду обробки з покриттям нітриду титану

Вид обробки сталі Р6М5	Твердість сталі, МПа	Теплостійкість сталі, °С	Товщина покриття, мкм	Мікротвердість, ГПа
Типова технологія	8600	550 °С	4,5	25
Запропонована технологія	9250/8500	580 °С	5,0	30

Примітка: в чисельнику твердість сталі З ЛО, в знаменнику твердість ділянок сталі без ЛО.

5.8. Триботехнічні властивості покриття TiN нанесеного за запропонованою технологією

Триботехнічні випробування в лабораторних умовах на машині тертя СМЦ-2 показали збільшення зносостійкості сталі Р6М5 із іонно-плазмовим покриттям TiN нанесеним за запропонованою технологією. Встановлено, що зносостійкість сталі Р6М5 іонно-плазмовим покриттям TiN нанесеним за запропонованою технологією в умовах тертя ковзання без змащування в 1,5-2,3

рази більша ніж сталі Р6М5 з іонно-плазмовим покриттям TiN нанесеним за типовою технологією, при більш тяжких умовах у 1.8-2,5 рази, а також у 2,7 та у 3,0 рази більша ніж сталі Р6М5 без обробки при таких самих режимах (рис. 5.20, 5.21). Встановлено вплив навантаження та швидкості ковзання на величину зносу сталі Р6М5 з іонно-плазмовими покриттями TiN нанесеним за запропонованою технологіями. Збільшення навантаження в 2 рази (при V = 1 м/с) приводить до підвищення зносу сталі Р6М5 у 1.5 рази, збільшення швидкості в 2 рази при навантаженні Р = 1 МПа збільшує знос у 1.4 рази.

Характер зношування покриття TiN майже однаковий, але зносостійкість нанесеного покриття за запропонованою технологією вища. Такі покриття можливо ефективно використовувати на високих режимах МО.

Підвищення зносостійкості сталі Р6М5 з покриттям нанесеним за запронованою технологією можна пояснити тим, що поверхневі шари РІ після ДЛО будуть поєднувати ділянки з різною твердістю, що надасть можливість релаксувати напруження, які виникають внаслідок дії сил тертя в покритті. Експериментальними дослідженнями встановлено, що площа обробки повинна бути 60 – 75 %. Це обумовлено створенням такого НДС, який забезпечує мінімальні напруження при терті, що встановлено аналітичними розрахунками (розділ 3, рис. 3.6), а також підтверджено експериментально підвищенням стійкості РІ та зносостійкості сталі Р6М5 (табл. 5.14, рис. 5.20-5.23).

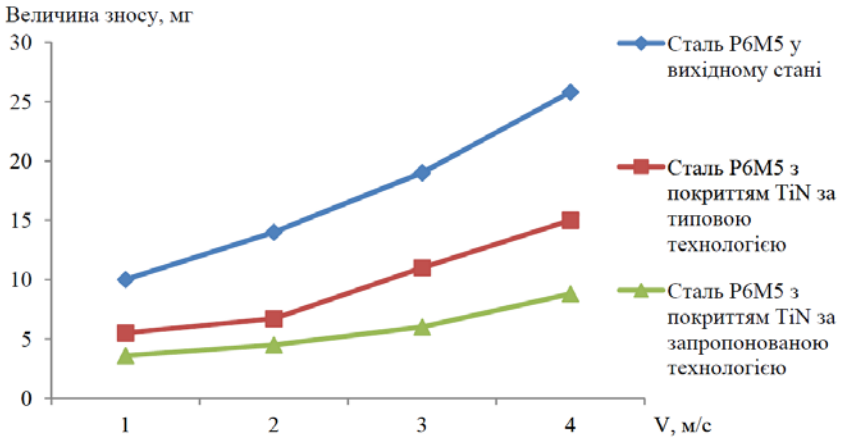


Рис. 5.20. Зносостійкість сталі Р6М5 з іонно-плазмовим покриттям TiN в залежності від способу нанесення і швидкості ковзання.

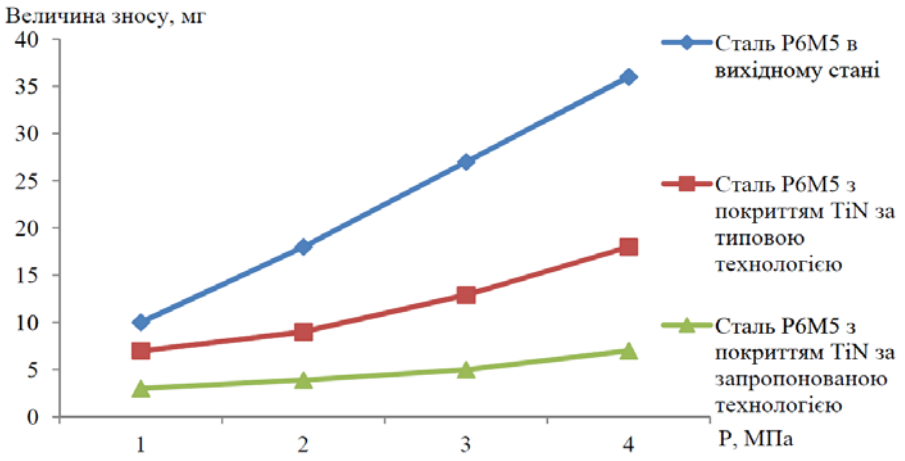


Рис. 5.21. Зносостійкість сталі Р6М5 з іонно-плазмовим покриттям TiN в залежності від способу нанесення і навантаження.

Були проведені дослідження залежності велечини коефіцієнта тертя від швидкості ковзання та від навантаження. Коефіцієнт тертя зменшився у 1,2-1,5 рази на всіх режимах випробувань у порівнянні з покриттям нанесеним за типовою технологією, а у порівнянні з сталлю Р6М5 у вихідному стані – у 1,5-1,8 рази.

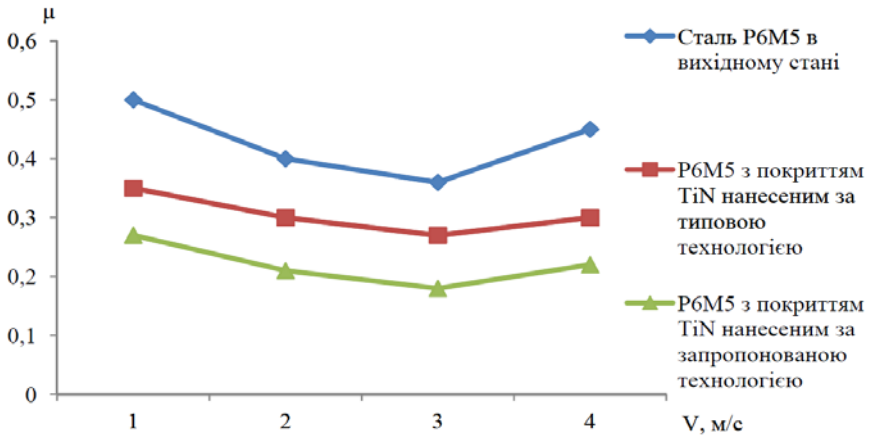


Рис. 5.22. Коефіцієнт тертя сталі Р6М5 з іонно-плазмовим покриттям TiN взалежності від способу нанесення і швидкості ковзання.

Внаслідок дослідження поверхонь тертя зразків зі сталі Р6М5 встановлено, що характер і величина зносу залежать від зовнішніх чинників [197]. Поверхня зносу іонно-плазмового покриття представлена на рис. 5.24. Розподіл хімічних елементів на рис. 5.25.

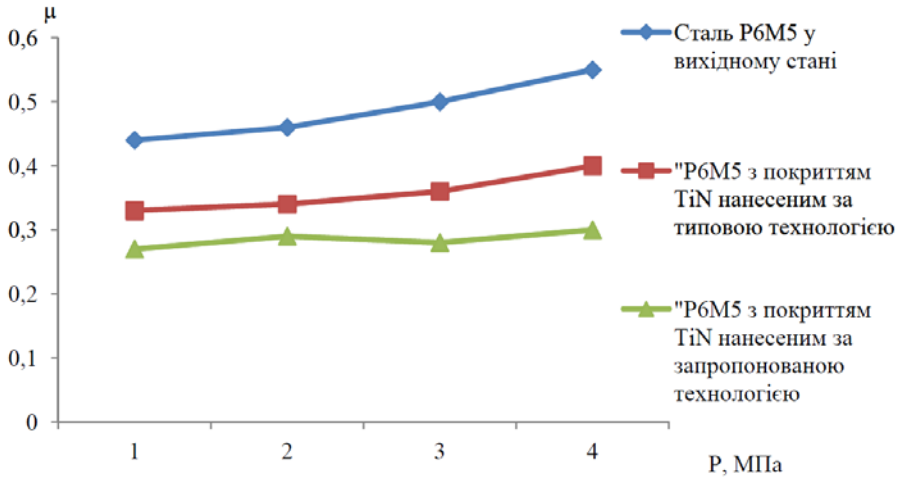
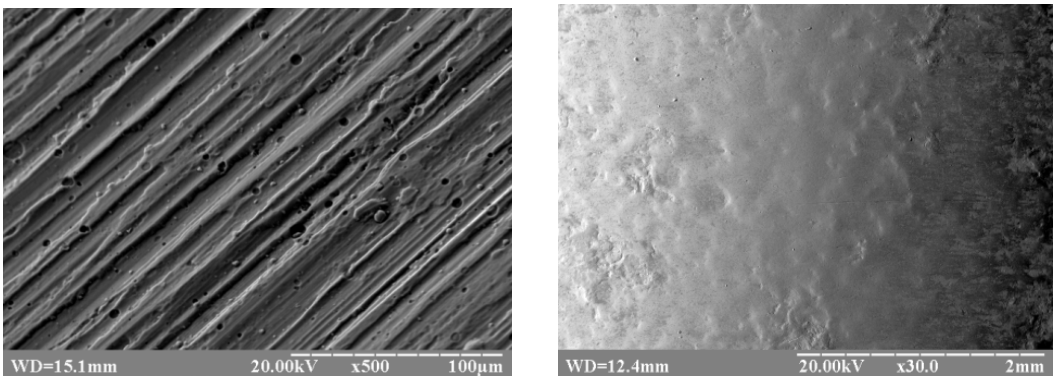


Рис. 5.23. Коефіцієнт тертя сталі Р6М5 з іонно-плазмовим покриттям TiN взалежності від способу нанесення і навантаження.



а б

Рис. 5.24. Зовнішній вигляд поверхонь тертя сталі Р6М5 без покриття (а) та з покриттям TiN нанесеним за запропонованою технологією (б)

Окислювальний процес зношування відбувається при невеликих швидкостях ковзання і питомому тискові, що зумовлює незначну величину зносу. Вторинні структури, що виникають в поверхневих шарах 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, який підтверджується металографічним аналізом. Характерними абразивними «борознами» характеризується поверхня тертя сталі Р6М5 без покриття (рис. 24, а), а з покриттям TiN нанесеним за запропонованою технологією (рис. 24, б)

спостерігається більш рівна поверхня – розвивається окислювальний знос, поверхня більш гладка, шорсткість зменшується [197].

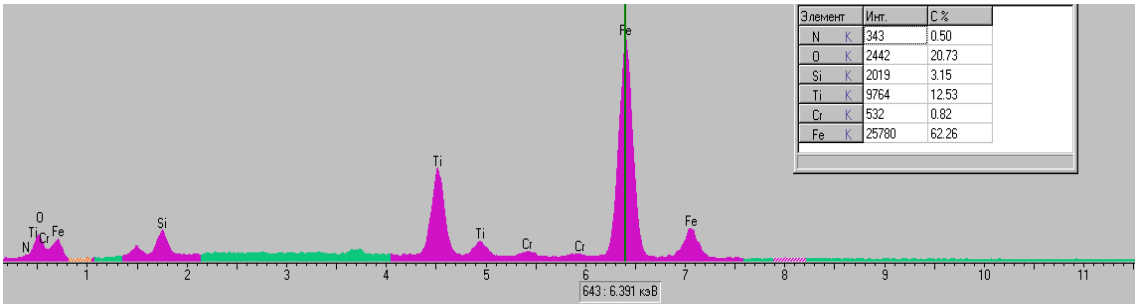


Рис. 5.25. Розподіл хімічних елементів сталі Р6М5 з іонно-плазмовими покриттями TiN

Дослідження абразивної зносостійкості сталі Р6М5 з покриттям TiN. Також покриття TiN нанесені за різними способами досліджували на зносостійкість в умовах абразивного зношування нежорстко закріпленими абразивними частинками (рис. 5.26). Результати на абразивну зносостійкість також показують збільшення зносостійкості даної технології за рахунок більшої твердості сталі і покриття (рис. 5.26) [197].

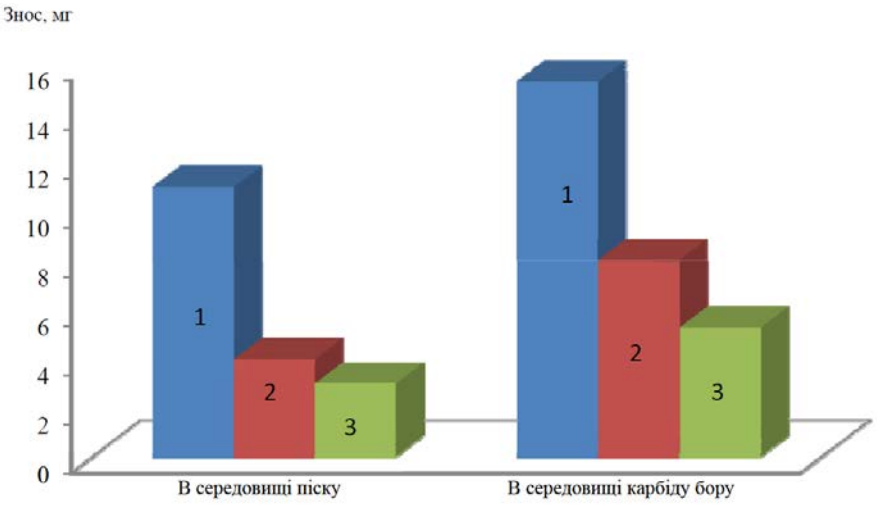


Рис. 5.26. Абразивна зносостійкість сталі Р6М5 взалежності від твердості абразиву: 1 – сталь Р6М5 у вихідному стані; 2 – сталь Р6М5 з іонно плазмоим покриттям TiN нанесеним за типовою технологією; 3 – сталь Р6М5 з іонно плазмоим покриттям TiN нанесеним за запропонованою технологією.

Дослідження стійкості РІ зі сталі Р6М5 з покриттям TiN. З метою визначення стійкості різальних пластин зі сталі Р6М5 з покриттями TiN

нанесеними різними способами проводили точінні заготівк із сталі 30ХГСА з охолодженням. Встановлено, що стійкість пластин, оброблених за даною технологією вища, ніж зносостійкість пластин, оброблених за типовою в 1,8 рази та у 2.8 ніж сталі у вихідному стані (рис. 5.27). Поверхня тертя PI представлено на рис. 5.28.

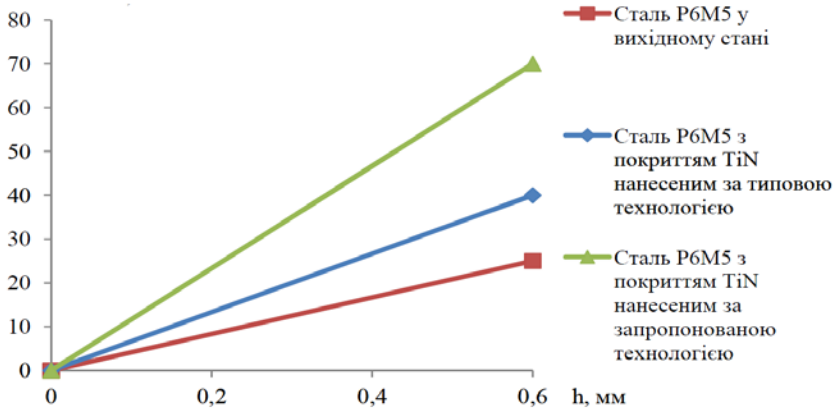


Рис. 5.27 Стійкість різальних пластин зі сталі Р6М5 з покриттями взалежності від виду обробки при точінні сталі

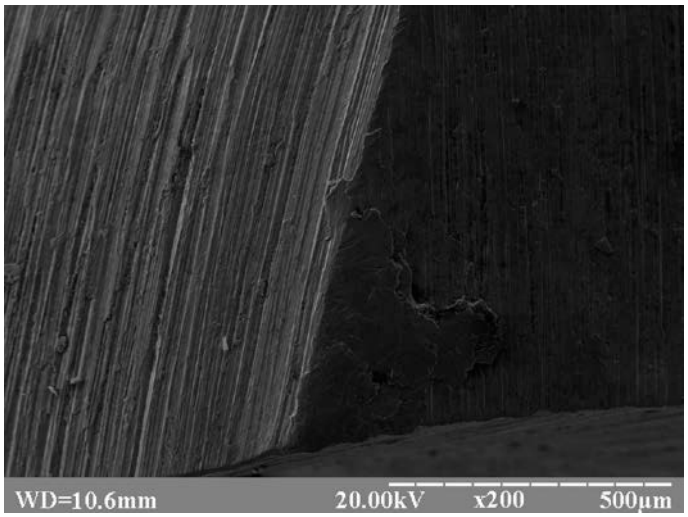


Рис. 5.28. Поверхня тертя різальної пластини зі сталі Р6М5 після точіння сталі 30ХГСА, х200

На поверхнях тертя після точіння спостерігаються прояви абразивного, втомного зношування, сліди викришування. Покриття TiN, має хороші фізико-механічні властивості і зносостійкість, зменшує коефіцієнт тертя за рахунок формуванні щільних вторинних структур (оксидних плівок) (5.29).

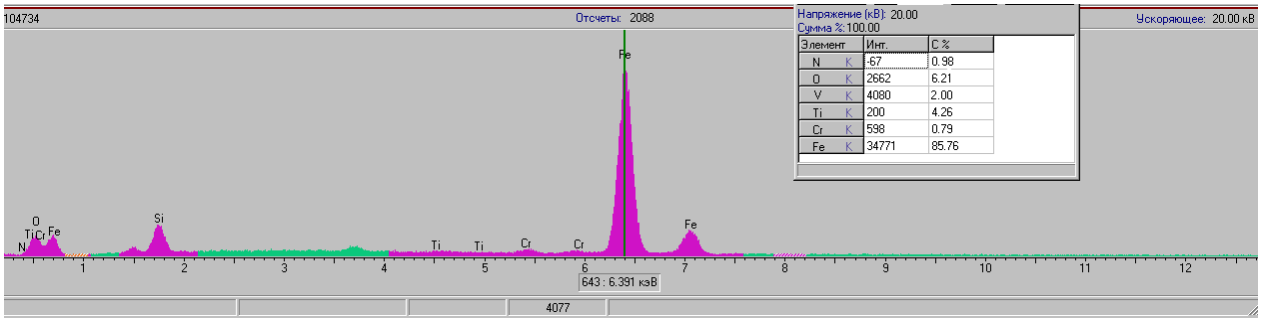


Рис. 5.29. Розподіл хімічних елементів сталі Р6М5 з іонно-плазмовими покриттями TiN після точіння

5.9. Висновки до розділу.

1. Розроблено технологічний процес формування БГП на основі Ti, Hf і Si. Висока припрацьовуваність і зносостійкість БГП обумовлена співвідношенням компонентів у верхньому (зовнішньому) підшарі, що забезпечує виконання правила додатнього градієнта механічних властивостей (менший зсувний опір) завдяки нижчій твердості і підвищеній пластичності порівняно з нижнім основним підшаром. Зовнішній прошарок товщиною 0,3 мкм за час «життя» утворює специфічні вторинні структури з високою стійкістю до температурно – силових впливів контактного фрикційного процесу і створює оптимальні умови для роботи основного матеріалу покриття, виключаючи його тріщиноутворення та крихке руйнування при різанні.

2. Триботехнічні випробування в умовах тертя ковзання без змащування показали збільшення зносостійкості в 2,3 – 2,7 в порівнянні зі сталлю Р6М5 з покриттям TiN та у 4,5 рази більша ніж сталі Р6М5 без обробки, коефіцієнт тертя зменшився у 1,6-1,9 та у 2,3-2,5 відповідно. Стійкість різальних пластин токарних різців з БГП при точінні сталі ХВГ вища, ніж стійкість пластин з покриттям TiN у 2,1 та у 3,4 рази в порівнянні з сталлю у вихідному стані.

3. Встановлено, що розроблене БГП володіє високою абразивною зносостійкість в умовах нежорстко закріплених абразивних частинок у порівнянні з покриттям TiN та сталлю Р6М5 у вихідному стані.

4. Проведено математичне моделювання формування зносостійких іонно-плазмових БГП на основі Ti, Hf та Si. Результати статистичного аналізу дозволяють зробити висновок, що регресійні залежності адекватні та інформативні, результати відтворені, коефіцієнти b_0 і b_i статистично значимі. Усе це говорить про те, що регресійні залежності адекватно описують процес і їх можна використовувати для аналізу та оптимізації технологічного процесу нанесення БГП.

5. Проведено багатокритеріальну оптимізацію технологічного процесу формування зовнішнього підшару верхнього шару БГП. Встановлено найоптимальніше поєднання рівнів конструктивних та технологічних факторів, що впливають на критерії оптимізації: тип покриття (X_1) – Ti (65%) Hf (30%) Si (5%), товщина покриття (X_2) – $3{,}1 \cdot 10^{-6}$ м, тиск реакційного газу (X_3) – 0,354 Па.

6. Встановлено механізм зношування сформованого БГП. Процес зношування РІ з іонно-плазмових 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 в присутності пластичного деформування, втомного, абразивного та адгезійного руйнування.

7. Розроблено триботехнологію комплексного підвищення експлуатаційних характеристик сталі Р6М5 при нанесенні іонно-плазмового покриття TiN, яка полягає у ДЛО 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.

8. Триботехнічні випробування іонно-плазмового покриття TiN нанесеного за даною технологією в умовах тертя ковзання показали збільшення зносостійкості в 1,5 – 1,8 в порівнянні з покриттям TiN нанесеним за типовою технологією, коефіцієнт тертя зменшується у 2,7-3.0 рази, коефіцієнт тертя зменшується у 1.2-1,5 рази та у 1.5-1.8 рази відповідно. Випробування

різальних пластин із сталі Р6М5 на стійкість при точінні заготівок із сталі 30ХГСА показали, що стійкість пластин з покриттям TiN нанесеним за запопонованою технологією вища, ніж стійкість пластин з покриттям TiN нанесеним за типовою технологією у 1,8 рази та у 2.8 рази порівняно з сталлю в вихідному стані. Результати на абразивну зносостійкість також показують збільшення зносостійкості даної технології у 1.5-1.7 рази за рахунок більшої твердості сталі і покриття.

9. Встановлено механізм зношування покриття TiN нанесеного за запопонованою технологією в умовах тертя ковзання без змащування та при точінні сталі 30ХГСА. Показано формування вторинних структур які зменшують коефіцієнт тертя та підвищують зносостійкість.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І 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 ДЛО і наступним азотуванням і досліджено особливості їх структуроутворення. Показано, що ЛО 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 можно застосовувати 60–75 % зміцнюючих ділянок (ДЛО 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 карбіду 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 матема-тичні моделі залежностей триботехнічних характеристик БГП від конструктивних, технологічних та експлуатаційних факторів проведено багатокритеріальну оптиміза-цію 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 ДЛО 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 ДЛО 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 ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Баранчиков В. И. Обработка специальных материалов в машиностроении : справочник / В. И. Баранчиков, А. С. Тарпанов, Г. А. Харламов. – М.: Машиностроение, 2002. – 264 с.

2. Залога В. А. Курс лекций "Инструментальные материалы для лезвийных инструментов": учеб. пос. / В. А. Залога. – Сумы: СумГУ, 2007. – 205 с.

3. Богуслаєв В. О. Основи технології машинобудування: навч. посібник / В. О. Богуслаєв, В. І. Ципак, В. К. Яценко. – Запоріжжя: Мотор СІЧ, 2003. – 336 с.

4. Davim J. P. Modern Machining Technology. A practicle guide / J.P. Davim. – Woodhead Publishing, 2011. – 412 p.

5. Abrate S. Machining of Composite Materials / S. Abrate // Composites Engineering Handbook. – New York, Marcel Dekker, Inc., 1997. – Vol. 11. – pp. 777 - 809.

6. Прогрессивные режущие инструменты и режимы резания металлов: справочник / В. И.Баранчиков, А. В. Жаринов, Н. В. Юдина, А. И. Садыхов., 1990. – 400 с.

7. Григорьев С. Н. Технологические методы повышения износостойкости контактных площадок режущего инструмента / С. Н. Григорьев, В. П. Табаков, М. А. Волосова. – Старый Оскол: ТНТ, 2011. – 379с.

8. Основи формоутворення поверхонь при механічній обробці: Навчальний посібник/ Н. С. Равська, П. Р. Родін, Т. П. Ніколаєнко, П. П. Мельничук. – Ж.: ЖІТІ, 2000. – 332с.

9. Металорізальні інструменти: навч. посібник. Ч. 2 / П. Р. Родін [та ін.] ; Київський політехнічний ін-т. – К. : ІСДО, 1993. – 180 с.

10. Инструмент для высоко-производительного и экологически чистого резания / Г. В. Боровский [и др.]. – М: Машиностроение, 2010. – 479 с.

11. Залога В. О. Сучасні інструментальні матеріали у машинобудуванні: навч. посіб. / В. О. Залога, В. Д. Гончаров, О. О. Залога. – Суми: СумДУ, 2013. – 371 с.

12.Лоладзе Т. Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента / Лоладзе Т. Н. – М.: Машиностроение, 1982. – 320с.

13.Новиков Н. В. Инструменты из сверхтвердых материалов. Монография / Н. В. Новиков. — М.: Машиностроение, 2005. – 555 с.

14. Davim J. P. Machining of Hard Materials / J. P. Davim. – Springer, 2011. – 538 p.

15. Механика деформирования и разрушения при резании. Том 1. Нестационарный процесс резания / [Б. В. Барбышев, У. С. Путилова, Р. Ю. Некрасов та ін.]. – Тюмень: ТюмГНТУ, 2012. – 212 с.

16. Основи теорії різання матеріалів: підручник / [М. П. Мазур, Ю. М. Внуков, В. Л. Доброскок та ін.]. – Львів: Новий Світ – 2000, 2010. – 422 с.

17. Якубов Ф. Я. Структурно-энергетические аспекты упрочнения и повышения стойкости режущего инструмента / Ф. Я. Якубов, В. А. Ким. – Симф.: Крымучпедгиз, 2005. – 300 с.

18. Основы теории резания материалов: учебник / [Мазур Н. П., Внуков Ю. Н., Грабченко А. И. и др.]. – 2-е изд., перераб. и дополн. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2013. – 534 с.

19. Калмин Б. И. Физико-химические процессы при обработке металлов резанием / Б. И. Калмин, М. С. Корытов. – Омск: СибАДИ, 2003. – 109 с.

20. Якимов А. В. Теплофизика процессов механической обработки: учеб. пособие / А. В. Якимов, П. Т. Слободяник, А. В. Усов. – К.: Либідь, 1991. – 240 с.

21. Trent E. M. Metal Cutting 4th Edition / E. M.T rent, P.K. Wright. – Boston: Butterworth–Heinemann, 2000. – 464 p.

22. Внуков Ю. М. Зношування і стійкість різальних лезових інструментів: навч. посіб. / Ю. М. Внуков, В. О. Залога. – Суми: СумДУ, 2010. – 243 с.

23.Ящерицын П. И. Теория резания. Учебник / П. И.Ящерицын, Е. Э.Фельдштейн, М. А. Корниевич. – 2-е изд., испр. и доп. – Мн.: Новое знание, 2006. – 512 с.

24. Воронцов А. Л. Теоретические основы обработки металлов в

машиностроении / А. Л. Воронцов. – Старый Оскол: ТНТ, 2014. – 552 с.

25. Milton C. Shaw. Metal cutting principles / Milton C. Shaw. – Oxford University Press; 2 edition, 2004. – 672 p.

26. НДР №659-ДБ10 Фізико-хімічні основи трибологічних процесів підвищення працездатності різального інструменту формуванням зносостійких композиційних багатошарових покриттів, 2012. – 102 с.

27. Трибологія: підручник / [М. В. Кіндрачук, В. Ф. Лабунець, М. І. Пашечко та ін.]. Вид-во НАУ «НАУ – друк», 2009. – 392с.

28. Klocke F. Manufacturing Processes 1: Cutting / F. Klocke. – Springer-Verlag. – Berlin, 2011. – 504 p.

29. Верещака А. С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями / А. С. Верещака. – М.: Машиностроение, 1993. – 336 с.

30. Верещака А. С. Физические основы процесса резания и изнашивания режущего инструмента с износостойкими покрытиями : учеб. пособие / А. С. Верещака, В. П. Табаков. – Ульяновск: УлГТУ, 1998. – 144 с.

31. Костюк Г. И. Исследование износа РИ с покрытием при его моделировании на машине трения / Г. И. Костюк, А. В. Фадеев, А. Н. Куринной, Т. П. Босенко // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов, 2010. – Вып. 3. – С. 104-112.

32. Андреев А. А. Эффективные наноструктурные многослойные покрытия для режущих инструментов и деталей медицинского назначения, работающих в динамическом режиме / А. А. Андреев, Г. И. Костюк, Н. А. Минаев // Авиационно-космическая техника и технология, 2012. – № 2. - С. 28–33.

33. Костюк Г. И. Температурные напряжения в многослойных и однослойных покрытиях и работоспособность деталей и режущего инструмента / Г. И. Костюк, Н. Л. Белов // Авіаційно-космічна техніка і технологія, 2003. – № 2. – С. 23–31.

34. Лопата Л. А. Расчет параметров дискретной структуры покрытий на режущем инструменте и деталях машин / Лопата Л. А. Ляшенко Б. А., Антонюк

В. С., Сорока Е. Б. // Вестник Полоцкого государственного університету, 2005. – С. 44– 46.

35. Антонюк В. С. Дискретні покриття на різальному інструменті / В.С. Антонюк, О. Б. Сорока, Б. А. Ляшенко, А. В. Рутковський // Проблеми прочности, 2007. – № 1. – С. 138-143.

36. Антонюк В. С. Аналіз напружено-деформованого стану різального інструменту з покриттями / В. С. Антонюк, О. Б. Сорока, В. І. Калініченко // Вісник НТУУ «КПІ». Приладобудування: збірник наукових праць, 2004. – Вип. 27. – С. 86–91.

37. Антонюк В. С. Особливості визначення параметрів покриття на різальному інструменті / В. С. Антонюк // Вісник НТУУ «КПІ». Приладобудування : збірник наукових праць, 2004. – Вип. 28. – С. 129–132.

38. Григорьев С. Н. Методы повышения стойкости режущего инструмента : учеб. / С. Н. Григорьев. – М: Машиностроение, 2009. – 368 с.

39. Табаков В. П. Формирование износостойких ионно-плазменных покрытий режущего инструмента. – М.: Машиностроение, 2008. – 311 с.

40. Табаков В. П. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями на основе сложных нитридов и карбонитридов титана / В. П. Табаков. – Ульяновск: УлГТУ, 1998. – 122 с.

41. Табаков В. П. Комбинированная упрочняющая обработка режущего инструмента / В. П. Табаков, С. Н. Власов; под ред. Е. М. Булыжева. – Димитровград: ДиТУД, 2003. – 124 с.

42. Ковришкін М.О. Методи формування покриттів на різальному інструменті / М. О. Ковришкін, О. В. Шевченко, С. О. Довжук // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація, 2010. – Випуск 23. – С. 344-351.

43. Харламов Ю. А. Методы модифицирования поверхностных слоев деталей машин и инструментов / Ю. А. Харламов // Сучасне машинобудування, 2000. – №3-4(5-6). – С. 9-17.

44. Васин С. А. Резание металлов: термомеханический подход к системе

взаимосвязей при резании: Учеб. для техн. вузов. / С. А. Васин, А. С. Верещака, В. С. Кушнир. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 448 с.

45. Зенин Б. С. Современные технологии поверхностного упрочнения и нанесения покрытий чебное пособие. - 2-е изд / Б. С. Зенин, А. И. Слосман. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 120 с.

46. Корбут Е. В. Современные методы поверхностного упрочнения инструментов / Е. В. Корбут, В. Ф. Лабунец // Проблеми тертя та зношування, 2010. – Вип. 54. – С. 149-153.

47. Лабунець В. Ф. Тенденції створення захисних структур триботехнічного призначення / В.Ф. Лабунець // Проблеми тертя та зношування, 2006. – Вип. 45. – С. 107–118.

48. Эдигаров, В. Р. Классификация комбинированных методов обработки на основе электромеханического упрочнения / В. Р. Эдигаров, И. Ю. Килунин, В. В Дегтярь // Современные наукоемкие технологии, 2012. – № 3 – С. 32–35.

49. Работоспособность торцовых фрез с многослойными износостойкими покрытиями / В. П. Табаков, М. Ю. Смирнов, А. В. Циркин. Ульяновск: УлГТУ, 2005. – 152 с.

50. Мазуренко Є.А. Хімічне осадження з газової фази, синтез функціональних матеріалів (огляд) / Є.А. Мазуренко // Фізика і хімія твердого тіла. – Т.2. – №3, 2001. – С. 339-349.

51. Gorbenko O. Y. MO CVD of perovskites with metallic conductivity / O. Y. Gorbenko, A. L. Kaul, A. A. Molodyk et al. // Journal of Alloys and compounds. – №251, 1997. – pp. 337-341.

52. Кадыржанов К. К., Комаров Ф. Ф., Погребняк А.Д. и др. Ионно-лучевая и ионно-плазменная обработка материалов. – М.: МГУ, 2005. – 640 с.

53. Локтев Д. А. Основные виды износостойких покрытий / Д. А. Локтев, Е. А. Ямашкин. – Наноиндустрия, 2007. – №4. – С.18-24.

54. Костюк, Г. И. Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и

упрочнения, комбинированных технологий. Кн.1: Физические процессы плазменно-ионных, ионно-лучевых, плазменных, светолучевых и комбинированных технологий / Г. И. Костюк. – К.: Изд-во АИНУ, 2002. – 596 с.

55. Панарин В. Е. Потенциальные возможности упрочнения режущего инструмента композиционными покрытиями с углеродными нанотрубками / В. Е. Панарин, Н. Е. Свавильный, А. И. Хоминич и др. // Проблеми тертя та зношування, 2011. – Вип. 56. – С.5–16.

56. Орлов А. С. Упрочнение сверл из Р6М5 импульсной магнитной обработкой / А. С. Орлов, В. А. Полетаев // Мат-лы докладов междунар. науч.-техннч. конф. «Состояние и перспективы развития электротехнологии» Иваново (1-3 июня 2005 г.). – Иваново: ИГЭУ, 2005. – Т. 2. – С. 153.

57. Голубець В. М. Розробка нового евтектичного електродного сплаву для нанесения зносостійких покриттів на ріжучий інструмент комплексним електроіскровим легуванням і лазерною обробкою // В. М. Голубецъ, О. В. Білоус // Проблемы трибології, 2001. – №2. – С.56–61.

58. Электроискровое легирование и последующая обработка инструмента из быстрорежущих сталей / М. С. Ковальченко, А. В. Паустовский, В. П. Ботвинко, Тамаров А. П. // Порошковая металлургия, 1996. – № 5/6. – С. 11–15.

59. Електроіскрові покриття для зміцнення різального інструменту / В. І. Калініченко, В. Є Марчук, М. І. Денисенко та ін. // Проблеми тертя та зношування, 2016. – Вип. 3(72). – С. 40-46.

60. Лабунець В. Ф. Підвищення абразивної стійкості сталі 45 комбінованими покриттями / В. Ф. Лабунець, М. І. Денисенко , О. В. Радько, В. В. Загребельний // Проблеми тертя та зношування, 2016. – Вип. 2(71). – С.45-49.

61. Евтушенко А. Т. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез инструментальной стали / А. Т. Евтушенко // Известия Томского политехнического университета [Известия ТПУ], 2008. – Т. 313. – № 3: Химия. Физика. – С. 100-104.

62. Лабунець В. Ф. Трибобіомінералогія – новий напрямок в науці про тертя / В. Ф. Лабунець, Р. Я Белєвцев, І. О. Козлова, Г. Г. Голембієвський // Проблеми тертя та зношування, 2016. – Вип. 4(73). – С. 40-46.

63. Корбут Є. В. Підвищення стійкості різального інструменту комбінованими методами поверхневого зміцнення / Є. В. Корбут, О. В. Радько, О. В. Андрєєв та ін. // Проблеми тертя та зношування, 2014. – Вип. 4 (65). – С. 105-110.

64. Маковкін О. М. Тертя та зношування інструментальних матеріалів зі зносостійкими покриттями : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. : спец. 05.02.04 "тертя та зношування в машинах" / Маковкін О. М. – Хмельницький, 2009. – 21 с.

65. Маковей В. А. Формирование и исследование комбинированных износостойких покрытий режущих элементов штампов / В. А. Маковей, Ю. П. Бородий // Обработка материалов давлением, 2016. – № 1(42). – С. 273-279.

66. Орлов А. С. Лазерная обработка режущего инструмента с электроискровым покрытием / А.С. Орлов, А.И. Орлова, В.В. Селезнев и др. // Применение лазеров в народном хозяйстве (17-20 мая 1985) всес. конф.: тезисы докл. – Звенигород. – М. – Наука, 1985. – С.91.

67. Верещака А. А. Некоторые тенденции совершенствования функциональных покрытий для режущих инструментов / А. А. Верещака, А. С. Верещака // Інформаційні технології в освіті, науці та виробництві, 2014. – Вип. 2(7). – С. 109-129.

68. Верещака А. С. Высокоэффективные многослойнокомпозиционные покрытия с наноразмерными слоями для режущего инструмента / А. С. Верещака, А. А. Верещака, Л. Г. Дюбнер // Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2005. – Вып. 69. – С. 21–36.

69. Carvalho N. J. M. Stress analysis and microstructure of PVD monolayer TiN and multilayer TiN/(TI,Al)N coatings / N. J. M. Carvalho, E .Zoestbergen, B. J. Kooi et al. // Thin Solid Films, 2003. – V.429. – № 1–2. – P. 170–189.

70. Musil J. Hard and superhard nanocomposite coatings / J. Musil // Surface and Coatings Technology, 2000. – V.125. – P. 322– 330.

71. Верещака А. С. Наноразмерные многослойно-композиционные покрытия для повышения износостойкости и работоспособности

твердосплавных концевых фрез / А. С. Верещака, А. А. Верещака, Ю. И. Бубликов, М. Г. Оганян // Резание и инструмент в технологических системах, 2014. – Выпуск 84. – С. 26-42.

72. Максимов Ю. В. Нанодисперсные многослойно-композиционные покрытия для режущих инструментов / Ю. В. Максимов, Ю. И. Бубликов, А. А. Верещака и др. // Известия МГТУ «МАМИ». – №2(14), 2012. – Т. 2. – С. 222-230.

73. Каменева А. Л. Структура и свойства покрытий, получаемых в условиях низкотемпературного плазменного синтеза на быстрорежущих сталях и сплавах : дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук : 05.02.01 Каменева Анна Львовна. – Пермь, 2002. – 189 с.

74. Григорьев С. Н. Повышение надежности режущего инструмента путем комплексной ионно-плазменной поверхностной обработкой: дисс. д-ра.техн.наук: 05.03.01 «Процессы механической и физико-технической обработки, станки и инструмент» / Григорьев С. Н. – Москва, 1995. – 497 с.

75. Костюк Г. И. Влияние комбинированной лазерно-плазменно-ионной обработки на свойства поверхностного слоя / Г. И. Костюк, О. О. Бруяка, К. П. Мисяк // Компьютерные и информационные технологии при моделировании, в управлении и экономике: сборник научных трудов. – С.29-36.

76. W. Grzesik C. A. van Luttervelt An Investigation of the Thermal Effects in Orthogonal Cutting Associated with Multilayer Coatings / W. Grzesik C. A. van Luttervelt // CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2001. – Volume 50. – Issue 1. – P. 53-56.

77. Xinxiang Pan. Elastic-plastic deformation analysis of multi-layer surface coating under sliding contact / Xinxiang Pan., Liu Yan, Jinjun Xu // Thin Solid Films,1999. – V. 354, №1–2. – P. 154– 161.

78. Локтев Д. В. Основные виды изностойких покрытий / Д. В. Локтев // Стружка, 2004. – № 5. – С. 6–11.

79. Dobrzański L. A. Characterisation of the gradient coatings tin/(Ti,Al,Si)N/TiN type deposited on sintered tool materials / L. A. Dobrzański, K. Gołombek // la metallurgia Italiana Volume 14 Issue 1-2 January-February 2006 p.

29-34.

80. Маринский А. Г. Некоторые особенности электронно-лучевой технологии получения твердых градиентных покрытий на основе карбида титана с добавкой хрома и их характеристики / А. Г. Маринский, С. С. Полищук // Пробл. спец. Электрометаллургии, 2001. – № 3. – С. 30-33.

81. Ляшенко Б. А. Упрочняющие покрытия дискретной структуры / Б. А. Ляшенко, А. Я. Мовшович, А. И. Долматов // Технологические системы, 2001. – № 4 (10).– С. 17–25.

82. Ляшенко Б. А. Розробка нових зносостійких покриттів для підвищення експлуатаційних характеристик деталей механізмів / Б. А. Ляшенко, В. С.Антонюк, О. Б. Сорока, А. В. Рутковський // Зб. Динаміка, міцність і надійність сільськогосподарських машин: міжнар. наук.-техн. конф. – Тернопіль.: ТДТУ ім. І. Пулюя, 2004. – С. 381-386.

83. Ляшенко Б. А. Упрочняющие покрытия дискретной структуры / Б. А. Ляшенко, А. Я. Мовшович, А. И. Долматов // Технологические системы, 2001. – № 4 (10). – С. 17–25.

84. Ляшенко Б. А. Применения дискретных покрытий в режущих инструментах / Б. А. Ляшенко, С. А. Клименко // Резание и инструмент в технологических системах, 2016. – Выпуск 86. – с.74-82.

85. Антонюк В. С. Основи підвищення працездатності різального інструменту шляхом формування зносостійких покриттів дискретного типу : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук : спец. 05.03.01 "процеси механічної обробки, верстати та інструменти" / Антонюк В. С. – Київ, 2006. – 32 с.

86. Григорьянц А. Г. Технологические процессы лазерной обработки / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюров. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. – 664 с.

87. Кіндрачук М. В. Триботехнічні властивості плазмових покриттів з дискретною структурою / М. В. Кіндрачук, Н. В. Іщук, В. В. Пастернак // Проблеми трибології, 2003. – № 1. – С.75 – 81.

88. J. Lawrence Advances in Laser Materials Processing / J. Lawrence, J.

Pou, D. K. Y. Low and E. Toyserkani // Technology, Research and Application. – Woodhead Publishing, 2010 – 806 p.

89. Костюк Г.И. Эффективный режущий инструмент с покрытием упрочненным слоем. Справочник / Г.И. Костюк. – К.: Антиква, 2003. – 412 с.

90. Кіндрачук М.В. Поверхневе зміцнення сталей нанесенням дискретних азотованих шарів / М. В. Кіндрачук, М. С. Яхья, О. В. Герасимова, Н. В. Іщук // Технологічні системи, 2007. - №1. – С. 45-49.

91. Кіндрачук М. В. Напружено-деформований стан дискретно оброблених лазером сталей під час контактної взаємодії / М. В. Кіндрачук, А. О. Корнієнко, С. В. Федорчук // Проблеми тертя та зношування, 2006, Вип. 46. – С. 29-39.

92. Лабунец В. Ф. Лазерная обработка трущихся поверхностей деталей машин и инструмента / В. Ф. Лабунец // Вісн. НАУ, 1998. №1. – С. 72 - 76.

93. Чудина О. В. Комбинированные методы поверхностного упрочнения сталей с применением лазерного нагрева. Теория и технология / О. В. Чудина // М.: МАДИ (ГТУ), 2003. – 248 с.

94. Yilbas B. S. Laser Surface Processing and Model Studies / B. S. Yilbas, S.Z. Shuja. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. – IX. – 147 p.

95. Кіндрачук М. В. Визначення параметрів дискретної структури покриттів триботехнічного призначення / М. В. Кіндрачук, М. С. Яхья, А. О. Корнієнко, Н. В. Іщук // Проблеми тертя та зношування, 2008. – Вип. 50. – С. 5-15.

96. Zhang Y. Laser Shock Processing of FCC Metals: Mechanical Properties and Micro-structural Strengthening Mechanism / Y. Zhang, Lu J., Luo K. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. – XI, 194 p.

97. Технологические лазеры: Справочник: Т. 1. Расчет, проектирование и эксплуатация / Г. А. Абильсиитов, В. С. Голубев, В. – Гонтарь и др. / Под общ. ред. Г. А. Абильсиитова. – М.: Машиностроение, 1991. – 432 с.

98. Yilbas B. S. Laser Pulse Heating of Surfaces and Thermal Stress Analysis / B. S. Yilbas, A. Y. Al-Dweik, N. Al-Aqeeli, H.M. Al-Qahtani. – Springer

International Publishing. – Switzerland, 2014. – 180 p.

99. Прохорова А. И. Поверхностная лазерная обработка / А. И Прохорова. М.: Университет машиностроения, 2016. – 42 с.

100. Моделирование теплофизических процессов импульсного лазерного воздействия на металлы / А. А.Углов, И. Ю. Смуров, А. А. Лашин, А. Г. Гуськов, 1991. – 287 с.

101. Афанасьева Л. Е., Барабонова И. А. Лазерная и криогенная обработка быстрорежущих сталей: монография / Л. Е. Афанасьева, И. А. Барабонова // Тверь: Тверской Государственный технический университет, 2014. – 96 с.

102. Матеріалознавство: навчальний посібник / М. В. Кіндрачук, В. Ф. Лабунець, Т. С. Климова, І. Г. Черниш. – К.: НАУ, 2012. – 492 с.

103. Арзамас Б. М. Матеріалознавство / Б. М. Арзамас. – М.: Із МГТУ ім. Н. Е. Баумана, 2003. – 648 с.

104. Л. Г. Ворошнин Л. Г. Теория и технология химико-термической обработки / Ворошнин, О. Л. Менделеева, В. А. Сметкин. – Учебное пособие М.: Новое знание; Минск: Новое знание, 2010. – 304 с.

105. Підвищення стійкості різального інструменту технологічними методами : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. / [Тарельник В. Б. та ін.] ; за ред. проф. В. Б. Тарельника. – Суми: Університетська книга, 2011. – 189 с.

106. Bryson W.E. Heat Treatment: Master Control Manual Carl Hanser Verlag / W.E. Bryson. – Munich, Germany, 2015. – 346 p.

107. Czerwinski F. Heat Treatment: Conventional and Novel Applications / F. Czerwinski (Ed.). –InTech, 2012. – 408 p.

108. Диффузионные карбидные покрытия / Лоскутов В. Ф., Хижняк В. Г., Куницкий Ю. А., Киндрачук М. В. – Киев: Техника, 1991. – 168 с.

109. Хижняк В. Г. Структура та властивості твердого сплаву ВК8 з комплексними покриттями за участю азоту, титану та алюмінію / В. Г. Хижняк, М. В. Аршук, Т. В. Лоскутова, Т. Л. Пересенчук // Проблеми тертя та зношування, 2010. – Вип. 54. – С. 218-229.

110. Хижняк В. Г. Титанохромування твердого сплаву ВК8 за умов

зниженого тиску в середовищі хлору / В. Г. Хижняк, А. І. Дегула, Т. В. Лоскутова // Металознавство та обробка металів. – Київ, 2008. – №4. – С. 36-40.

111. Лоскутова Т. В. Комплексні карбідні покриття на металах і сплавах : монографія / Т. В. Лоскутова, В. І. Сігова, В. Г. Хижняк, В. Ф. Лоскутов; Сум. держ. ун-т. – Суми, 2009. – 190 с.

112. Лоскутова Т. В. Будова і захисні властивості комплексних хромотитаноалітованих дифузійних покриттів на сталі У8А / Т. В. Лоскутова // Наукові вісті Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут", 2015. – № 6. – С. 38-45.

113. Хижняк В. Г. Азототитанування сталей і твердих сплавів / В. Г. Хижняк, Н. А. Курило, І. В. Летвицька, О. Т. Сердітов // Наукові вісті НТУУ “КПІ”, 2008. – № 6. – С. 83–88.

114. Хижняк В. Г. Будова та механічні властивості карбідних та нітридних покриттів титану, ванадію та хрому на сталі У8А / В. Г. Хижняк, Н. А. Курило // Металознавство та обробка металів, 2007. – № 3. – С. 17–21.

115. Луника М. Н. Упрочнение поверхности стали карбидами титана и хрома / М. Н. Луника // Металловведение и термическая обработка металлов, 1993. – № 2. – С. 18–20.

116. Арзамасов Б. Н. Циркуляционный метод химико-термической обработки / Б. Н. Арзамасов // Металловедение и термическая обробка металлов, 2004. № 6. – С. 3–6.

117. Базалеева Ю. О. Механизмы влияния азота на структуру и свойства сталей (обзор) / Ю. О. Базалеева // Металловедение и термическая обробка металлов, 2005. – 10 (604). – С. 17–23;

118. Rakhit A. K. Heat Treatment of Gears. A Practical Guide for Engineers Materials Park / A. K. Rakhit. – ASM International, 2000. – 213 p.

119. Бедункевич В. В. Структура і товщина іонно-плазмових покриттів нітриду титану на швидкорізальній сталі / В. В. Бедункевич, М. В. Гордон, Л. И. Миркин // Фізика і хімія обробки матеріалів, 1986. – №3. – С. 57-61.

120. Мацевитий Б. М. Покриття для різальних інструментів / Б.М. Мацевитий. – Харків: Вища школа. – Вид-во Харківського ун-та, 1987. – 128 с.

121. Инструкция «Рекомендации по нанесению износостойких покрытий на инструмент из быстрорежущей стали на установке «Булат 21М». – Харьков: Укроргстанкинпром, 1981. – 23 с.

122. Пат. 98227 України. 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.; № u 201410946; Заявл.07.10.2014; опубл. 27.04.2015, Бюл. № 8. – 5 с.;

123. Пат. 99744 України. Спосіб зміцнення металорізального інструменту з швидкорізальних сталей / Кіндрачук М.В., Корбут Є.В., Лабунець В.Ф., Радько О.В., Загребельний.В.В., Гуменюк І.А; № u 201412996; Заявл.04.12.2014; опубл. 25.06.2015, Бюл. № 12. – 4 с.;

124. Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников: ГОСТ 9450–76. – [Чинний від 1976-01-09]. – М.: ИПК издательство стандартов, 1976. – 33 с.

125. Пат. 906908 України. Різальний інструмент з двошаровим нанокристалічним покриттям / Азарєнков М. О, Береснєв В. М. Клименко С. А. Гриценко В. і. Литовченко С. В. Колесніков Д. О. Погребняк О. Д. Турбін П. В., Грудницький В. В. Чишкала В. О. № u 201104122; Заявл.05.04.2011; опубл. 12.12.2011, Бюл. № 23.

126. Стасовская В.В. Исследование твердости, хрупко- сти и абразивной способности порошков тугоплавких со- единений: Автореферат канд. дис. – Киев, 1967.–24 с.

127. Кіндрачук М. В. Локальный характер напряженно-деформированого состояния композиционного материалла, нагруженного силами трения / М. В. Кіндрачук, Я. В. Душек, М. В. Лучка // Порошковая металлургия, 1995. – №5-6. – С. 56-61.

128. Крагельский И. В. Коэффициенты трения [Текст] : справочное пособие / И. В. Крагельский, И. Э. Виноградова. - 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Машгиз , 1962. – 220 с.

129. ГОСТ 23.208-79 Обеспичение износостойкости изделий. Метод

испытания материалов на износостойкость при трении о нежерстко закрепленные абразивные частицы.

130. Лабунець В.Ф. Зносостійкість сталі 65г в умовах абразивного зношування / В.Ф. Лабунець, М.І. Денисенко, В.В. Загребельний // Проблеми тертя та зношування. 2015. – 1 (66). – с. 113-117.

131. Кудрин А.П. Исследование износостойкости упрочненной углеродистой стали в условиях абразивного изнашивания / А.П. Кудрин, В.Ф. Лабунец, О.А. Вишнев- ский. – К.: Вісник НАУ, 2003. – № 2. – С. 111 – 114.

132. Евдокимов Ю. А. Планирование и анализ эксперимента при решении задач трения и износа / Ю. А. Евдокимов, В. И. Колесников, А. И. Тетерин. – М.: Наука, 1980. – 228 с.

133. Винер Н. Кибернетика или управление и связь в животном и машине: пер. с англ. / Н. Винер; под ред. Г. Н. Поварова. – [2-е изд.]. – М.: Наука, 1983. – 343 с.

134. Тихомиров В. Б. Планирование и анализ эксперимента (при проведении эксперимента в лёгкой и текстильной промышленности) / В. Б. Тихомиров. – М.: Легкая индустрия, 1974. – 264 с.

135. Винарский М. С. Планирование эксперимента в технологических исследованиях / М. С. Винарский, М. В. Лурье. – К.: Техніка, 1975. – 168 с.

136. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов: пер. с нем. / под ред. Э. К. Лецкого. – М.: Мир, 1977. – 552 с.

137. Барабащук В. И. Планирование эксперимента в технике / Барабащук В. И., Креденцер Б. П., Мирошниченко В. И. – К.: Техніка, 1984. – 200 с.

138. Толбатов Ю. А. Математична статистика та задачі оптимізації в алгоритмах і программах: навч. посіб. / Ю. А. Толбатов. – К.: Вища школа, 1994. – 399 с.

139. Налимов В. В. Теория эксперимента / В. В. Налимов. – М.: Наука, 1971. – 207 с.

140. Радченко С. Г. Математическое моделирование технологических процессов в машиностроении / С. Г. Радченко. – К.: Укрспецмонтажпроект, 1998. – 274 с.

141. Радченко С. Г. Методология создания новой техники и технологий / С. Г. Радченко, С. Н. Лапач // Технологические системы, 2003. – № 1. – С. 41–44.

142. Радченко С. Г. Математичне моделювання та оптимізація технологічних систем: навчальний посібник / С. Г. Радченко. – К.: Політехніка, 2001. – 88 с.

143. Лапач С. Н. Статистические методы в фармакологии и маркетинге фармацевтического рынка / С. Н. Лапач, М. Ф. Пасечник, А. В. Чубенко. – К. : Укрспецмонтажпроект, 1999. – 312 с.

144. Соболь И. М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критеріями / И. М. Соболь, Р. Б. Статников. – М. : Наука, 1981. – 111 с.

145. Елементи дослідження складних систем військового призначення / Загорка О. М., Мосов С. П., Сбитнєв А. І., Стужук П. І. – К.: НАОУ, 2005. – 100 с.

146. Лапач С. Н. Пакет прикладных программ ПРИАМ: информ. листок о науч.-техн. достижении № 88–007 / Лапач С. Н., Радченко С. Г., Литвинчук Н. И. – К.: УкрНИИНТИ, 1988. – 4 с.

147. Программные продукты Украины. Планирование, регрессия и анализ модели ПРИАМ: каталог / НТУ КПИ; под ред. Лапач С. Н., Радченко С. Г., Бабич П. Н. – К.: Текпор, 1993. – С. 24—27.

148. Ахтизарова С. Л. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии: учеб. пособие для студ. хим.-технол. вузов / С. Л. Ахтизарова, В. В. Кафаров. – [2-е изд.]. – М.: Высш. шк., 1985. – 337 с.

149. Вучков И. Прикладной линейный регрессионный анализ / И. Вучков, Л. Бояджиева, Е. Солаков / пер. с болг. и предисл. Ю. П. Адлера. — М.: Финансы и статистика, 1987. – 239 с.

150. Подиновский В. Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач / В. Д. Подиновский, В. Д. Ногин. – М.: Наука, 1982. – 254 с.

151. Евланов Л. Г. Экспертные оценки в управлении / Л. Г. Евланов, В. А. Кутузов. – М.: Экономика, 1978. – 133 с.

152. Большев Л. Н. Таблицы математической статистики / Л. Н. Большев, Н. В. Смирнов. – [3-е изд.]. – М.: Наука, 1983. – 416 с.

153. Жиглявский А. А. Методы поиска глобального экстремума / А. А. Жиглявский, А. Г. Жилинскас. – М.: Наука, 1991. – 248 с.

154. Радченко С. Г. Устойчивые методы оценивания статистических моделей / С. Г. Радченко. – К.: Санспарель, 2005. – 504 с.

155. Лахтин Ю. М. Азотирование стали / Ю. М. Лахтин, Я. Д. Коган. – М.: Машиностроение, 1976. – 256 с.

156. Пат. 107190 Україна, МПК (2016.01) C23C 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.

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

158. 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.

159. 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.

160. 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.

161. 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.

162. 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.

163. 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.

164. Поверхностная прочность материалов при трении / Б. И. Костецкий, И. Г. Носовский, А. К. Караулов и др. / Под ред. Б. И. Костецкого. – К.: Техника, 1976. – 296 с.

165. 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.

166. 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.

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

168. 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.

169. 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.

170. Тот Л. Карбиды и нитриды переходных металлов / Л. Тот. – М.: Мир, 1974. – 296 с.

171. Основи трібології: Підручник / Антипенко А.М. , Бєлас О.М., Войтов В.А. та ін. / За ред. Войтов В.А. – Харків: ХНТУСГ, 2008. – 342с.,

172. Костецкий Б.И. Структурно-энергетическая приспосабливаемость материалов при трении// Трение и износ. – Минск, 1985. – Т.VI. – № 2. – С. 201–212.с.

173. Ваниев Э. Р. Влияние режимов упрочняющей приработки на стойкость инструмента при фрезеровании стали 12Х18Н10Т с использованием различных сотс / Э. Р. Ваниев, Э. Ш. Джемилов, А. И. Алиев, Э. Л. Бекиров // Сучасні технології в машинобудуванні, 2016. – вип. 11. – С. 245-252.

174. Зносостійкість виробів. Тертя, зношування та мащення. Терміни та визначення: ДСТУ 2823–94. – [Чинний від 1994—10—31]. – К.: Держстандарт України, 1994. – 32 с. – (Національний стандарт України).

175. Костецкий Б. И. Надежность и долговечность машин / Б. И. Костецкий, И. Г. Носовский, Л. И. Бершадский. – К.: Техніка, 1975. – 408 с.

176. Меделяев И. А. Влияние механических свойств пары ″сталь—бронза″ на коэффициент трения при граничной смазке / И. А. Меделяев // Вестник машиностроения, 2006. – № 2. – С. 41–44.

177. Налимов В. В. Логические основания планирования эксперимента / В. В. Налимов, Т. И. Голикова. – М.: Наука, 1976. – 128 с.

178. Румшинский Л. З. Математическая обработка результатов эксперимента / Л. З. Румшинский. – М.: Наука, 1971. – 192 с.

179. Федоров В.В. Теория оптимального эксперимента.– М.: Наука, 1971. – 312 с.

180. Крагельський И. В. Основы расчета на трение и износ / И. В.

Крагельський, М. Н. Добычин,. В. С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 256 с.

181. Самсонов Г. В. Электронная локализация в твердом теле / Г. . Самсонов, И. Ф. Прядко, Л. Ф. Прядко. – М.: Наука, 1976. – 338 с.

182. Внуков Ю. Н. Нанесение покрытий на быстрорежущий инструмент / Ю. Н. Внуков, А. А. Марков, Л. В. Лаврова, Н. Ю. Бердышев. – Киев: Техніка, 1992. – 143 с.

183. Гнесин Г. Г., Фоменко С.Н. Износостойкие покрытия на инструментальных материалах (Обзор) / Г. Г. Гнесин, С. Н. Фоменко // Порошк. Металлургия, 1996. – № 9–10. – С. 17–28.

184. Береснев В. М. Многокомпонентные и многослойные вакуумно-дуговые покрытия для режущего инструмента / В. М. Береснев, М. Ю. Копейкина, С. А. Клименко // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники (17), 2008. – № 1. – С. 152–158.

185. Pogrebnjak A.D. Featuresof the structural slate and mechanical properties ZrN and Zr (Ti)-Si-N coatings obtained by ion-plasma deposition technique / A. D. Pogrebnjak, O. V. Sobol, V. M. Beresnev et al. // Nanostructured Materials and Nanotechnolody IV: Ceramic Engineering and Science Proceedings, 2010. V. 31. – Issue 7. – P. 127–139.

186. Береснев В.М. Триботехнические свойства нанокомпозитных покрытий Ti–Zr–Si–N, осажденных ионно-плазменным методом / Береснев В.М., Каверин М.В., Ахмед М.М. и др. // Трение и износ, 2012. – 33, № 3. – С. 215–222.

187. Криони Н. К. Композиционные материалы с прогнозируемой адаптацией при трении и резании металлов / Н. К. Криони, М. Ш. Мигранов, Шустер Л.Ш. // Вестник УГАТУ, 2009. – 12, № 2(31). – С. 88–92.

188. Мацевитый В. М. Физико-технические аспекты адгезии твердых тел / В. М. Мацевитый, И. Б. Казак, К. В. Вакуленко. – К.: Наук. думка, 2010. – 253 с.

189. Мороз Л. С. Механика и физика деформаций и разрушения материалов / Л. С. Мороз. – Л.: Машиностроение, 1984. – 224 с.

190. Лисовский А. Ф. Спеченные твердые сплавы: самоорганизация

дефектов и концепция формирования структуры / А. Ф. Лисовский // Сверхтвердые материалы, 2001. – № 6. – С. 48-53.

191. Самотугин С. С. Инструментальные материалы: свойства и упрочнение // С. С. Самотугин, В. А. Мазур, Л. К. Лещинский, Ю. С. Самотугина. – Мариуполь: ПГТУ, 2013. – 430 с.

192. Тушинский Л. И. Исследование структуры и физико-механических свойств покрытий / Л. И. Тушинский, А. В. Плохов. – Новосибирск: Наука, 1986. – 200 с.

193. Гольдштейн М. И. Металлофизика высокопрочных сплавов / М. И. Гольдштейн, В. С. Литвинов, Б. М. Бронфин. – М.: Металлургия, 1986. – 312 с.

194. Верещака А. С. Повышение эффективности инструмента путем управления составом, структурой и свойствами покрытий / А. С. Верещака, А. А. Верещака // Упрочняющие технологии и покрытия, 2005, № 9. С.9-19.

195. Chokshi, A. H. On the validity of the Hall-Petch relationship in nanocrystalline materials. Scripta Metall / A. H. Chokshi, Rosen, A. Karch, J. Gleiter. – H. – v.23, 1998. – pp. 1679-1684.

196. Лахтин Ю. М. Материаловедение: Учебник для высших технических учебных заведений. 3-е изд., перераб. и доп. / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. –М.: Машиностроение, 1990. –528 с.

197. 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.

ДОДАТКИ

А. Акти виробничих випробувань та впровадження наукових досліджень.

Б. Отримані патенти.

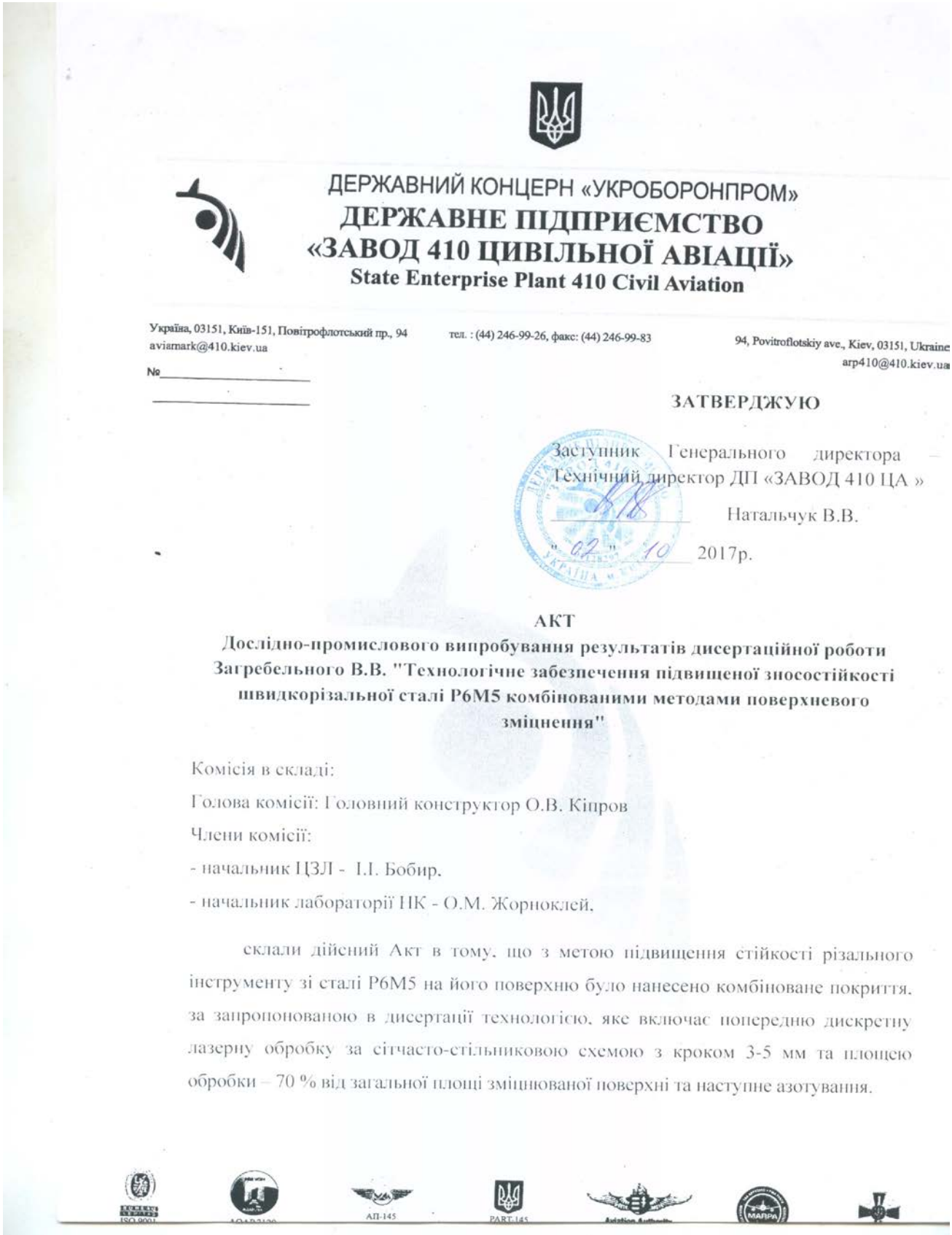
В. Список публікацій за темою дисертації.

Г. Участь у конференціях, конгресах, семінарах.

Д. Результати математичного моделювання БГП.

ДОДАТОК А

Акти впровадження та реалізації результатів наукових досліджень.



ДЕРЖАВНИЙ КОНЦЕРН «УКРОБОРОНПРОМ»
ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО
«ЗАВОД 410 ЦИВІЛЬНОЇ АВІАЦІЇ»
State Enterprise Plant 410 Civil Aviation

Україна, 03151, Київ-151, Повітрофлотський пр., 94 тел. : (44) 246-99-26, факс: (44) 246-99-83 94, Povitroflotskiy ave., Kiev, 03151, Ukraine
aviamark@410.kiev.ua arp410@410.kiev.ua

№_____

ЗАТВЕРДЖУЮ

Заступник Генерального директора –
Технічний директор ДП «ЗАВОД 410 ЦА »
_____ Натальчук В.В.
"02" 10 2017р.

АКТ
Дослідно-промислового випробування результатів дисертаційної роботи Загребельного В.В. "Технологічне забезпечення підвищеної зносостійкості швидкорізальної сталі Р6М5 комбінованими методами поверхневого зміцнення"

Комісія в складі:
Голова комісії: Головний конструктор О.В. Кіпров
Члени комісії:
- начальник ЦЗЛ - І.І. Бобир,
- начальник лабораторії НК - О.М. Жорноклей,

склали дійсний Акт в тому, що з метою підвищення стійкості різального інструменту зі сталі Р6М5 на його поверхню було нанесено комбіноване покриття, за запропонованою в дисертації технологією, яке включає попередню дискретну лазерну обробку за сітчасто-стільниковою схемою з кроком 3-5 мм та площею обробки – 70 % від загальної площі зміцнюваної поверхні та наступне азотування.

Результати випробувань даного покриття показали збільшення стійкості різального інструменту зі сталі Р6М5 у 1,7 – 2,2 рази і як наслідок – зменшення собівартості різального інструменту.

Результати роботи рекомендовані для впровадження у виробництво.

Голова комісії:
Головний конструктор О.В. Кіпров

Члени комісії:
Начальник ЦЗЛ І.І. Бобир
Начальник лабораторії НК О.М. Жорноклей

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор ФОП «Олійник П.І.»
_____ П. Олійник
«__1__» ____09____ 2017 р.

АКТ
про реалізацію результатів наукових досліджень
Загребельного Володимира Вікторовича

Комісія у складі:
голови комісії – директор ТОВ Олійник П.І.
та членів комісії – головний технолог Кравчук В.О.
токар 6-го розряду Гребенніченко В.П.

розглянула результати наукових досліджень Загребельного В.В. щодо покращення технології нанесення іонно-плазмових покриттів на установці типу «Булат», які полягають у дискретній лазерній обробці в режимі оплавлення поверхні невідпущеного інструменту з наступним відпуском загартованого інструменту при підвищених температурах 560 – 580 °С і суміщенням його з операцією нанесення покриттів.

На підставі даних, які були отримані при проведенні науково-технічних та експеременталь них дослідженнях в Національному авіаційному університеті встановлено, що запропоноване нове технологічне рішення буде використано для зміцнення різального інструменту зі сталі Р6М5 при точінні легованої термообробленої сталі ХВГ (HRC 61…63).

Впровадження різального інструменту з покриттям на основі нітриду титану нанесеного за запропонованою технологією дозволило скоротити витрати різального інструменту при обробці важкооброблюваних легованих сталей та отримати економічний ефект в сумі 45 000 гривень в рік.

Голова комісії _____ Олійник П.І.
Члени комісії _____ Кравчук В.О.
_____ Гребенніченко В.П.

ПОГОДЖЕНО
Проректор з навчальної та виховної роботи
_____ Т.Іванова
"21" 12 2017 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ
Проректор з наукової роботи
_____ В.П. Харченко
"14" 12 2017 р.

АКТ
про впровадження у навчальний процес
Національного авіаційного університету
результатів дисертаційної роботи Загребельного Володимира Вікторовича
на тему: „Технологічне забезпечення підвищеної зносостійкості швидкорізальної сталі Р6М5 комбінованими методами поверхневого зміцнення"

На основі матеріалів дисертаційної роботи Загребельного В.В. студентам представлено технологію нанесення комбінованих покриттів на швидкорізальну сталь Р6М5 з метою підвищення її працездатності в умовах механічної обробки. Представлено взаємозв'язок триботехнічіних показників та їх зміна в залежності від зовнішніх чинників. Показано вагомий вплив технологічних режимів нанесення покриттів на її зносостійкість в умовах тертя ковзання без мастильноохолоджуючих рідин.

Досліджено хімічний склад вторинних структур, які утворюються на робочих поверхнях контактуючих матеріалів при різанні, та їх вплив на зносостійкість сталі Р6М5.

Матеріали досліджень використані при викладанні дисципліни „Матеріалознавство" для студентів спеціальності 6.070103 «Обслуговування повітряних суден».

Акт обговорений і схвалений на засіданні кафедри машинознавства Навчально-наукового Аерокосмічного інституту (протокол №11 від 23 жовтня 2017 р.).

Завідувач кафедри машинознавства ННАКІ, д.т.н., професор — М.В. Кіндрачук

Секретар кафедри, к.т.н., доцент — О.В. Башта

ДОДАТОК Б

Отримані патенти.

УКРАЇНА

ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 99744

СПОСІБ ЗМІЦНЕННЯ МЕТАЛОРІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТА ЗІ ШВИДКОРІЗАЛЬНИХ СТАЛЕЙ

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі **25.06.2015.**

Голова Державної служби
інтелектуальної власності України А.Г. Жарінова

Державна служба інтелектуальної власності України
Ідентифікаційний код 37552556
№1

УКРАЇНА

ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 107190

СПОСІБ ОТРИМАННЯ ЗНОСОСТІЙКИХ ПОКРИТТІВ З ВИСОКОЮ ПРИПРАЦЬОВУВАНІСТЮ І ПІДВИЩЕНИМ ОПОРОМ ВТОМНОМУ РУЙНУВАННЮ

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі **25.05.2016.**

В.о. Голови Державної служби
інтелектуальної власності України А.А.Малиш

УКРАЇНА

ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 98227

ГРАДІЄНТНЕ ПОКРИТТЯ З ВИСОКОЮ ПРИПРАЦЬОВУВАНІСТЮ І ЗНОСОСТІЙКІСТЮ

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі **27.04.2015.**

Голова Державної служби
інтелектуальної власності України А.Г. Жарінова

ДОДАТОК В

Список публікацій за темою дисертації.

За кордоном:

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 швидкорі-зальних 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 азототитану-ванням, азотохромуванням 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 швидкорі-зальної 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, 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 комбі-нованими 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) C23C 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) C23C 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 C23C 14/32 (2006.01). Спосіб зміцнення металорізального 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.

ДОДАТОК Г

Участь у конференціях, конгресах, семінарах

Міжнародна науково-технічна конференція студентів та молодих вчених «Політ» (м. Київ, 2012 р, очна форма участі)

Міжнародні науково-технічні конференції «ABIA-2013» і «ABIA 2017» (м. Київ, 2013 і 2017 рр, очна форма участі),

Міжнародна науково-технічна конференція «Матеріали для роботи в екстремальних умовах – 5» (м. Київ, 2015 р, заочна форма участі),

5-а Міжнародна науково-технічна конференція «HightMatTech» (м. Київ, 2015 р, очна форма участі),

«Сучасні технології в механіці» (м. Хмельницьк, 2016 р, заочна форма участі),

The seventh World congress «Aviation in the XXI-st century» Safety in Aviation and Space Technology (Kyiv, 2016 р, очна форма участі),

XVII Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта» (м. Київ, 2016 і 2017 рр, заочна форма участі),

17-й Міжнародний науково-технічний семінар «Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте» (м. Свалява, 2017 р, заочна форма участі),

Науково-технічна конференція студентів, аспірантів, докторантів та молодих учених ”Інноваційні технології” (м. Київ, 2017 р, очна форма участі).

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

ДОДАТОК Д

Результати математичного моделювання БГП

Тертя

Количество главных эффектов - 10
Количество генерируемых взаимодействий - 120
Количество определяемых взаимодействий - 0
Всего взаимодействий и эффектов - 130
Типы генерируемых взаимодействий: 2; 3;
Ограничение главного эффекта по степени: Нет
Ограничение взаимодействия по степени: Нет

Список эффектов кандидатов

имя/номер коэффициента	коэффициент корелляции	имя/номер коэффициента	коэффициент корелляции
1 - x1	0.100069	2 - z1	0.215032
3 - x2	0.211604	4 - z2	0.0589057
5 - x3	0.121859	6 - z3	0.309474
7 - x4	0.98709	8 - z4	0.078082
9 - x5	0.207875	10 - z5	0.738578
11 - z1x4z5	0.525715	12 - x1z4x5	0.46005
13 - z3x5	0.369723	14 - z1z2x3	0.322475
15 - x1x2x4	0.32145	16 - z1z2z5	0.268702
17 - x3x4	0.24442	18 - z2x5	0.241113
19 - x4x5	0.22659	20 - z1z5	0.216031
21 - x3x5	0.138761	22 - z2x3x4	0.12095
23 - z2x3x5	0.118715	24 - z1x5	0.100603
25 - z1x3z5	0.0501782		

Получена модель:

$$Y = 0.155762-0.037136x4+0.0106448z1z4z5$$

где:

$$x1 = 0.313725*(X1 -3.8125); \quad z1 = 1.79184*((x1^2)-0.0455298*x1-0.396386);$$
$$x4 = 0.740741*(X4 -2.45); \quad z4 = 1.71634*((x4^2)-0.079615*x4-0.348423);$$
$$x5 = 0.76555*(X5 -2.49375); \quad z5 = 1.53668*((x5^2)-0.0205144*x5-0.350519);$$

АНАЛИЗ АДЕКВАТНОСТИ МОДЕЛИ

Остаточная дисперсия 1.36889e-005
Дисперсия воспроводимости 0.00776875
Расчетное значение F-критерия 39.2616
Уровень значимости F-критерия для адекватности 0.05
для степеней свободы v1 = 2 v2 = 13
Табличное значение F-критерия
(при отсутствии повторных опытов) 1.37408
Стандартная ошибка оценки 0.00372471
(скоррект. с учетом степеней свободы) 0.00385544
Модель адекватна

АНАЛИЗ ИНФОРМАТИВНОСТИ МОДЕЛИ

Доля рассеивания объясняемая моделью 0.977628
Введено регрессоров (эффектов) 3
Коэффициент множественной корреляции 0.988751
(скоррект. с учетом степеней свободы) 0.987942
F отношение для R 284.046
Уровень значимости F-критерия для информативности 0.05
для степеней свободы v1 = 2 v2 = 13
Табличное значение F-критерия для информативности 3.80557
Модель ИНФОРМАТИВНА
Критерий Бокса и Веца для информативности 7
Информативность модели ОЧЕНЬ ВЫСОКАЯ

ТАБЛИЦА СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

имя/номер коэффициента	коэффициент регрессии	станд.ошиб. коэф.регр.	вычислен. t знач.	доля участия
x4	-0.037136	0.000946816	-23.1517	0.974348
z1z4z5	0.0106448	0.00127497	1.38075	0.00328083

свободный член 0.155762

Таблица мультиколлинеарности

имя/номер регрессора	MAX коэф-ент корелляции	с каким регрессором	коэф. корелляции с откликом
x4	0	со всеми	0.98709
z1z4z5	0	со всеми	0.246038

Число обусловленности COND = 1.8133

Таблица остатков (по обучающей матрице)

номер	Отклик по эксперименту	Отклик по модели	Остаток	Процент отклонения
1	0.148	0.151945	-0.00394469	-2.66533
2	0.136	0.13238	0.00362006	2.66181
3	0.176	0.173639	0.00236054	1.34122
4	0.124	0.122417	0.00158254	1.27624
5	0.168	0.166714	0.00128639	0.765707
6	0.188	0.182856	0.00514391	2.73612
7	0.144	0.145261	-0.00126115	-0.875801
8	0.17	0.170472	-0.000472061	-0.277683
9	0.132	0.130006	0.00199443	1.51093
10	0.14	0.147163	-0.00716304	-5.11646
11	0.192	0.190946	0.0010536	0.548753
12	0.136	0.140465	-0.00446505	-3.28313
13	0.18	0.178262	0.00173797	0.96554
14	0.16	0.160648	-0.00064763	-0.404769
15	0.12	0.116465	0.00353498	2.94582
16	0.172	0.176361	-0.00436079	-2.53534

Средняя абсолютная погрешность аппроксимации - 0.0027893
Средняя погрешность аппроксимации в процентах - 1.86942

Остальные факторы зафиксированы на таких уровнях:
X5 = 1.2
-
Остальные факторы зафиксированы на таких уровнях: X4 = 3.8

Остальные факторы зафиксированы на таких уровнях: X5 = 1.2000000

-
Остальные факторы зафиксированы на таких уровнях: X4 = 3.8000000

Остальные факторы зафиксированы на таких уровнях: X1 = 7.0000000

Зношування

Количество главных эффектов - 10
Количество генерируемых взаимодействий - 120
Количество определяемых взаимодействий - 0
Всего взаимодействий и эффектов - 130
Типы генерируемых взаимодействий: 2; 3;
Ограничение главного эффекта по степени: Нет
Ограничение взаимодействия по степени: Нет

Список эффектов кандидатов

имя/номер коэффициента	коэффициент корелляции	имя/номер коэффициента	коэффициент корелляции
1 - x1	0.0357599	2 - z1	0.227577
3 - x2	0.193953	4 - z2	0.0789561
5 - x3	0.166521	6 - z3	0.278832
7 - x4	0.997528	8 - z4	0.0516623
9 - x5	0.17552	10 - z5	0.63186
11 - z1x4z5	0.545842	12 - x1z4x5	0.454784
13 - x1x2x4	0.402969	14 - z3x5	0.368284
15 - z1z2x3	0.332756	16 - z1z2z5	0.301414
17 - x2x5	0.220968	18 - x2x3	0.18152
19 - z2x3x4	0.154746	20 - x3x5	0.154069
21 - z2x5	0.152257	22 - z1z5	0.145264
23 - z1x5	0.136753	24 - z1x3z5	0.0373391

Получена модель:

$$Y = 3.72601+1.72347x4-0.0425083z1x4z5$$

где:

$$x1 = 0.313725*(X1 -3.8125);\ z1 = 1.79184*((x1^2)-0.0455298*x1-0.396386);$$
$$x4 = 0.740741*(X4 -2.45);\ z4 = 1.71634*((x4^2)-0.079615*x4-0.348423);$$
$$x5 = 0.76555*(X5 -2.49375);\ z5 = 1.53668*((x5^2)-0.0205144*x5-0.350519);$$

АНАЛИЗ АДЕКВАТНОСТИ МОДЕЛИ

Остаточная дисперсия 0.00632608
Дисперсия воспроводимости 0.18625
Расчетное значение F-критерия 176.571
Уровень значимости F-критерия для адекватности 0.05
для степеней свободы v1 = 2 v2 = 13
Табличное значение F-критерия для адекватности 3.80557
Табличное значение F-критерия
(при отсутствии повторных опытов) 1.37408
Стандартная ошибка оценки 0.0795445
(скоррект. с учетом степеней свободы) 0.0823364

Модель адекватна

АНАЛИЗ ИНФОРМАТИВНОСТИ МОДЕЛИ

Доля рассеивания объясняемая моделью 0.995091
Введено регрессоров (эффектов) 3
Коэффициент множественной корреляции 0.997542
(скоррект. с учетом степеней свободы) 0.997367
F отношение для R 1317.52
Уровень значимости F-критерия для информативности 0.05
для степеней свободы v1 = 2 v2 = 13
Табличное значение F-критерия для информативности 3.80557
Модель ИНФОРМАТИВНА
Критерий Бокса и Веца для информативности 16

Информативность модели ОЧЕНЬ ВЫСОКАЯ

ТАБЛИЦА СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

имя/номер коэффициента	коэффициент регрессии	станд.ошиб. коэф.регр.	вычислен. t знач.	доля участия
x4	1.72347	0.023556	43.1873	0.995062
z1x4z5	-0.0425083	0.029391	-0.274993	2.85574E-005

свободный член 3.72601

Таблица мультиколлинеарности

имя/номер регрессора	MAX коэф-ент корелляции	с каким регрессором	коэф. корелляции с откликом
x4	0	со всеми	0.997528
z1x4z5	0	со всеми	0.545842

Число обусловленности COND = 1.55678

Таблица остатков (по обучающей матрице)

номер	Отклик по эксперименту	Отклик по модели	Остаток	Процент отклонения
1	3.75	3.78924	-0.0392382	-1.04635
2	4.75	4.81096	-0.0609567	-1.2833
3	2.75	2.89623	-0.14623	-5.31746
4	5.25	5.20511	0.0448935	0.855115
5	3.25	3.27612	-0.0261166	-0.803588
6	2.5	2.37536	0.124642	4.98569
7	4.25	4.30602	-0.0560173	-1.31805
8	3	3.0265	-0.026503	-0.883432
9	5	4.93204	0.0679646	1.35929
10	4	4.04291	-0.0429127	-1.07282
11	2.25	2.13315	0.116847	5.19319
12	4.4	4.42742	-0.0274232	-0.623255
13	2.65	2.62769	0.0223097	0.841876
14	3.55	3.53391	0.0160897	0.453231
15	5.55	5.45827	0.091729	1.65277
16	2.7	2.75908	-0.0590778	-2.18807

Средняя абсолютная погрешность аппроксимации - 0.0605595

Средняя погрешность аппроксимации в процентах - 1.86734

Остальные факторы зафиксированы на таких уровнях:
X5 = 1.2
-
Остальные факторы зафиксированы на таких уровнях:
X4 = 3.8
-
Остальные факторы зафиксированы на таких уровнях:
X1 = 7
-
Остальные факторы зафиксированы на таких уровнях: X5 = 1.2000000

-
Остальные факторы зафиксированы на таких уровнях: X4 = 3.8000000

-
Остальные факторы зафиксированы на таких уровнях: X1 = 7.0000000