

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ІНЖЕНЕРІЇ, ТРАНСПОРТУ ТА АРХІТЕКТУРИ
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

Пояснювальна записка

до дипломної роботи

магістра

Освітньо-кваліфікаційний рівень

Галузь знань 13 Механічна інженерія

Шифр і назва галузі знань

Напрямок підготовки (спеціальність): 132 «Матеріалознавство,
Відновлення та технічний сервіс автомобілів»

Шифр і назва напрямку підготовки (спеціальності)

на тему: **«Вплив покриття з нітриду титану на фрикційні властивості пар тертя»**

Шифр МРТАМ 23.18093.000 ПЗ

Виконав: *студент 2-го курсу,*
група МТВАм-22-1



Підпис

В.Ю. Вовк
Ініціали, прізвище


Керівник *к.т.н., доц. каф ТАМ.*



Підпис

С. Ф. Посонський
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:
Зав. кафедри ТАМ *д.т.н., проф.*



Підпис

О. В. Диха
Ініціали, прізвище

18 12 2023 р.

Хмельницький, 2023

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет *інженерної, транспортної та архітектурної*
Кафедра *трибології, автомобілів та матеріалознавства*
Освітній рівень *магістр*

Спеціальність *132 «Матеріалознавство»*

Спеціалізація *«Відновлення та технічний сервіс автомобілів»*

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ТАМ



Диха О.В.

16 жовтня 2023 року

ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Вовку Вадиму Юрійовичу

Прізвище, ім'я, по батькові

1. Тема роботи: *Вплив покриття з нітриду титану на фрикційні властивості пар тертя.*

керівник роботи: Посонський Сергій Феліксович, доцент каф. ТАМ.

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, місце роботи

Затверджено наказом університету від 1.03.2023 р., № 5 (Д 26)

2. Строк подання студентом проекту (роботи) на кафедру 16.12.2023 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) *Матеріали курсових проектів, переддипломної практики.*

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1) *Методи формування фрикційних властивостей пар тертя.*

2) *Аналіз досліджень фрикційних властивостей покриттів.*

3) *Методика та обладнання для досліджень покриттів.*

4) *Експериментальні дослідження фрикційних властивостей покриттів.*

5) *Висновки, рекомендації.*

5. Перелік графічного матеріалу (презентація):

Розробити презентацію у вигляді слайдів з розкриттям питань відповідно до мети роботи.

5. Консультанти розділів проекту (роботи)

| Розділ | Прізвище, ініціали та посила консультанта | Підпис, дата | |
|--------|---|----------------|------------------|
| | | завдання видав | завдання прийняв |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

7. Дата видачі завдання 16 жовтня 2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів дипломного проекту (роботи) | Строк виконання етапів проекту (роботи) | Примітки |
|-------|--|---|----------|
| 1 | Методи формування фрикційних властивостей пар тертя | 30.10.23 | вик |
| 2 | Аналіз досліджень фрикційних властивостей покриттів | 15.11.23 | вик |
| 3 | Методика та обладнання для досліджень покриттів | 23.11.23 | вик |
| 4 | Експериментальні дослідження фрикційних властивостей покриттів | 4.12.23 | вик |
| 5 | Висновки, рекомендації | 6.12.23 | вик |
| 6 | Оформлення пояснювальної записки | 12.12.23 | вик |
| 7 | Захист дипломної роботи | 23.12.23 | |

Студент


Підпис

Вовк В. Ю.
Ініціали, прізвище

Керівник роботи


Підпис

Посонський С. Ф.
Ініціали, прізвище

РЕФЕРАТ

Студент групи МТВАм-22-1 Вовк Валдим Юрійович.

Структура та обсяг пояснювальної записки. Дипломна робота на тему «Вплив покриття з нітриду титану на фрикційні властивості партертя.» складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, який налічує 23 найменувань, розміщених на 3 сторінках, та __ додатків розміщених на __ сторінках. Роботу викладено на 90 сторінках, з них 81 сторінок основного тексту, на яких розміщено 21 рисунок і 26 таблиць.

Загальною властивістю для всіх нітридів перехідних металів є утворення фаз впровадження. При цьому фази застосування стехіометричного складу мають відносно прості кристалічні ґрати на базі типових металевих упаковок, у міжатомних проміжках яких розташовані атоми впровадження. Характерною рисою тугоплавких сполук, побудованих за типом фаз впровадження, є здатність утворювати дефектні структури з нестачею атомів неметалу в ґратах, що значною мірою впливає на їх властивості.

Мікротвердість плівок TiN залежно від вмісту азоту та структурних особливостей варіюється в межах 20 – 40 ГПа. Велика твердість конденсованого TiN є наслідком високого рівня внутрішніх напружень, які становлять 109-1010 Па для покриттів, отриманих фізичними методами. Наявність таких напружень підтверджується збільшенням параметра ґратки, що становить 0,425 нм для стехіометричних плівок. При цьому величина параметра ґратки прямо пропорційна вмісту азоту і обернено пропорційна товщині плівки.





Нанокристалічні та навокомполитні матеріали в більшості випадків характеризуються підвищеною твердістю та досить високою термостійкістю до окислення, що робить їх особливо привабливими для використання як зносостійкі, зміцнювальні та термостійкі покриття для оброблювального інструменту при робочих температурах, що не перевищують 1300 °С.

Мета роботи: дослідження впливу складу покриттів з нітриду титану, що формуються іонно-плазмовим методом, на фрикційні властивості партертя при механічній обробці матеріалів.

Ключові слова: ФРИКЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ; ІОННО-ПЛАЗМОВЕ ПОКРИТТЯ; НІТРИД ТИТАНУ; НЕСТЕХІОМЕТРИЧНИЙ СКЛАД; ШОРСТКІСТЬ; КОЕФІЦІЄНТ ТЕРТЯ; ЗНОСОСТІЙКІСТЬ.

ЗМІСТ

| | |
|--|----|
| ВСТУП | 6 |
| РОЗДІЛ 1. МЕТОДИ ФОРМУВАННЯ ФРИКЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПАР ТЕРТЯ | 10 |
| 1.1 Конструкційні матеріали вузлів тертя. | 10 |
| 1.1.1 Металеві антифрикційні матеріали. | 11 |
| 1.1.2 Антифрикційні матеріали, одержувані з порошків та пластмас. | 13 |
| 1.2 Методи отримання зносостійких покриттів. | 17 |
| РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ФРИКЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОКРИТТІВ | 31 |
| 2.1 Особливості формування тонко плівкових вакуумних покриттів. | 31 |
| 2.2 Фрикційні властивості покриттів. | 39 |
| РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ПОКРИТТІВ. | 49 |
| 3.1 Вибір матеріалу зразка. | 49 |
| 3.2 Підготовка мікро шліфів. | 54 |
| 3.3 Технологічний процес нанесення покриттів. | 56 |
| 3.4 Обладнання та методика вимірювання шорсткості зразків з покриттями. | 64 |
| 3.5 Методика і обладнання для визначення коефіцієнта тертя. | 70 |

| | | | | | |
|---------------------------|-----|------------|---|------|--|
| ДРМТВАТАМ 23.18093.000 ПЗ | | | | | |
| Зм | Арк | № Докум. | Підпис | Дата | |
| Виконав | | Вовк |  | | Вилів покриття з нітриду титану на фрикційні властивості пар тертя |
| Перевір. | | Посонський |  | | |
| Н.контр. | | Бабак |  | | Літера |
| Затвер. | | Диха |  | | Аркуш |
| | | | | | Аркушів |
| | | | | | 4 |
| | | | | | 90 |
| | | | | | ХНУ МТВАм-22-1 |

| | |
|--|----|
| РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ФРИКЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОКРИТТІВ. | 75 |
| 4.1 Експериментальні дослідження хімічного складу зразків. | 75 |
| 4.2 Результати вимірювань шорсткості зразків. | 76 |
| 4.3 Експериментальні дослідження фрикційних властивостей. | 78 |
| ВИСНОВКИ | 86 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ | 87 |
| ДОДАТКИ | 90 |

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | ДРМТВАТАМ 23.18093.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 5 |

ВСТУП

Незважаючи на те, що останні кілька десятиліть тонкі плівки на основі тугоплавких нітрідів перехідних металів досить добре вивчені і широко застосовуються в якості різноманітних покриттів у багатьох галузях людської діяльності, науково-практичний інтерес до них не згасає, оскільки ці сполуки, завдяки своїм специфічним фізико-механічним властивостям (велика твердість, абразивна стійкість, тугоплавкість, пластичність при високих температурах тощо), є особливо привабливими для створення нанокompatитних матеріалів на їх основі.

На даний момент існує безліч опублікованих робіт про тугоплавкі сполуки, у тому числі і про нітриди. Ці сполуки характеризуються різноманіттям різних типів хімічних зв'язків речовин чим і пояснюється варіювання у широкому діапазоні їх хімічних та фізикомеханічних властивостей. Наприклад, нітриди неметалів є ковалентними з'єднаннями класу діелектриків, а нітриди перехідних металів з дефіцитом азоту в більшості випадків мають напівпровідникові властивості і являють собою з'єднання зі змішаним іонно-ковалентно-металевим типом зв'язку. Нітриди перехідних металів з надлишком азоту в більшості випадків мають металеві властивостями.

Загальною властивістю для всіх нітрідів перехідних металів є утворення фаз впровадження. При цьому фази застосування стехіометричного складу мають відносно прості кристалічні ґрати на базі типових металевих упаковок, у міжатомних проміжках яких розташовані атоми впровадження. Характерною рисою тугоплавких сполук, побудованих за типом фаз впровадження, є здатність утворювати дефектні структури з нестачею атомів неметалу в ґратах, що значною мірою впливає на їх властивості.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | ДРМТВАТАМ 23.18093.000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 6 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

В даний час найбільш вивченими серед нітридів металів IV групи є нітриди титану і плівки TiN, отримані як за допомогою фізичних, так і за допомогою хімічних методів осадження.

Властивості TiN сильно залежать від кількості азоту в нітриді та від швидкості осадження покриття. Так, при високій швидкості осадження може бути отримана дуже дрібнозерниста і, отже, дуже спотворена структура, що містить метастабільні фази, тоді як при низьких швидкостях осадження формується луската структура [1].

Мікротвердість плівок TiN залежно від вмісту азоту та структурних особливостей варіюється в межах 20 – 40 ГПа. Велика твердість конденсованого TiN є наслідком високого рівня внутрішніх напружень, які становлять 109-1010 Па для покриттів, отриманих фізичними методами. Наявність таких напружень підтверджується збільшенням параметра ґратки, що становить 0,425 нм для стехіометричних плівок. При цьому величина параметра ґратки прямо пропорційна вмісту азоту і обернено пропорційна товщині плівки.

Одним із недоліків, що обмежують перспективу використання таких покриттів у промисловості, є їх низька окисна стійкість. При нагріванні вище 550 °С на поверхні покриття TiN починає рости крихкий з низькою адгезією шар оксиду титану у фазі рутила, який швидко руйнує захисну стійкість покриття [1].

Таким чином, зносостійкість, термостабільність та стійкість до окислення аналізованих покриттів не високі і суттєво залежать від способу отримання покриття та концентрації реагентів у ньому. Причому при переході нітридів металів IV групи (TiN, ZrN, HfN) до нітридів металів V (VN, NbN, TaN) і особливо VI групи (CrN, MoN, WN) опір до високотемпературного окислення знижується.

Результати сучасних досліджень наведені у науково-технічних публікаціях різних авторів, свідчать про те, що подальше підвищення

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | ДРМТВАТАМ 23.18093.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 7 |

ефективності захисно-зміцнювальних, зносостійких покриттів на основі твердих з'єднань перехідних металів, зокрема нітридів, можливо шляхом створення нанокристалічних та нанокомпозитних матеріалів [2-4].

Внаслідок значного збільшення об'ємної частки меж розділу такі покриття виявляють у ряді випадків унікальне поєднання властивостей: високу твердість, зносостійкість, окислювальну стійкість і одночасно високий коефіцієнт пружного відновлення, та низький коефіцієнт тертя.

У більшості випадків наноструктурні покриття формуються шляхом хімічного або фізичного осадження газометалевих плазмових потоків при оптимально підібраних умовах та певних концентраціях реагентів. Механізм утворення нанокомпозитних структур пов'язують із сегрегацією однієї фази за межами зерен іншої фази, у результаті якої припиняється зростання кристалітів. Цей процес реалізується шляхом введення до складу зростаючого конденсату легуючих елементів або з допомогою бомбардування конденсату, що росте, потоком іонів, а також різними комбінаціями цих методів. Управління структурою та фазовим складом покриття здійснюється зазвичай підбором режимів осадження, зміною концентрації легуючих елементів, парціальних тисків робочої газової суміші та температури підкладки, додатком до підкладки негативних напружень зміщення або бомбардуванням її пучками газових іонів з високою енергією.

Крім цього, дослідження показали, що у нанокристалічних матеріалах процеси руйнування здійснюються шляхом розриву міжатомних зв'язків з високими енергетичними бар'єрами, характерними для тугоплавких сполук типу нітридів. Тому, нанокристалічні та нанокомпозитні матеріали в більшості випадків характеризуються підвищеною твердістю та досить високою термостійкістю до окислення, що робить їх особливо привабливими для використання як зносостійкі, зміцнювальні та термостійкі покриття для оброблювального інструменту при робочих температурах, що не перевищують 1300 °С.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | ДРМТВАТАМ 23.18093.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 8 |

Таким чином метою роботи є дослідження впливу складу покриттів з нітриду титану, що формуються іонно-плазмовим методом, на фрикційні властивості пар тертя при механічній обробці матеріалів.

Завдання роботи:

1. Виконати аналіз існуючих методів формування покриттів із заданими фрикційними властивостями пар тертя.

2. Виконати аналіз досліджень фрикційних властивостей покриттів.

3. Дослідити вплив складу покриттів з нітриду титану на фрикційні властивості пар тертя.

4. Надати практичні рекомендації щодо призначення складу та технологічних режимів нанесення покриттів з нітриду титану, що забезпечують необхідний комплекс експлуатаційних властивостей при механічній обробці певних матеріалів.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | ДРМТВАТАМ 23.18093.000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 9 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

РОЗДІЛ 1. МЕТОДИ ФОРМУВАННЯ ФРИКЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПАР ТЕРТЯ.

1.1 Конструкційні матеріали вузлів тертя.

Вибір конструкційних матеріалів деталей вузлів тертя при прагненні до високих експлуатаційних характеристик є однією з базових проблем трибології [5-7]. Таке завдання розглядається фахівцями у галузі трибоматеріалознавства.

Основними завданнями трибоматеріалознавства є відбір відомих та створення нових матеріалів, що володіють оптимальними для даного вузла тертя характеристиками, що забезпечують необхідний ресурс. При цьому, крім досягнення необхідних експлуатаційних властивостей, потрібно враховувати економічні міркування, виходячи з ринкових умов. Тому трибоматеріалознавство зазвичай вирішує компромісні завдання доцільного співвідношення між рівнем експлуатаційних характеристик та собівартістю.

Усі матеріали вузлів тертя можна розділити на дві групи: антифрикційні та фрикційні. Перші застосовуються при створенні рухомих з'єднань з низьким тертям та високою зносостійкістю: підшипників кочення та ковзання, шарнірних з'єднань, що направляють для повзунів, ексцентрикових та кулачкових механізмів тощо. Фрикційні застосовуються в гальмах, фрикційних передачах та муфтах. Вони повинні мати не тільки високий і стабільний коефіцієнт тертя, але і високу зносостійкість.

При виборі матеріалів вузлів тертя повинна враховуватися їхня сумісність, особливо використання схоплювання та подальшого задира, що пов'язано з хімічною спорідненістю, близькістю будови та значень параметрів кристалічних решіток. У більш загальній формі під сумісністю розуміють здатність матеріалів забезпечувати оптимальні параметри вузла

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | ДРМТВАТАМ 23.18093.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 10 |

тертя при тривалій експлуатації, швидко пристосовуватися до різких змін навантаження, швидкості та температури за несприятливих умов мастила.

Процес приробітку повинен закінчуватися утворенням на поверхнях тертя тонких шарів вторинних структур, що оберігають матеріал від захоплювання і задир, а також рівноважної шорсткості, необхідної для забезпечення стабільного значення коефіцієнта тертя.

У цій галузі наукою ще не повністю розкрито механізми самоорганізації в зоні контакту та шляхи впливу на здатність пар тертя до самоорганізації, коли система сама формує оптимальну мікрогеометрію поверхонь, захисні плівки, перебудовує структуру поверхневих шарів металу, змінює твердість з метою збереження нормального функціонування. Перспективним у цьому напрямі є створення на поверхнях, що труться, самоорганізуючі тонкі шари–покриття, з метою, якою використовує фізичні та хімічні методи синтезу покриттів на поверхні деталей.

1.1.1 Металеві антифрикційні матеріали.

Антифрикційні матеріали використовуються переважно у відповідальних напрямних вузлах, підшипниках, шарнірах ковзання та кочення, розподільних валах, клапанних та кулачкових механізмах тощо.

Цапфи підшипників ковзання зазвичай виготовляють із сталей та чавунів.

Найбільш часто застосовують леговані сталі: марганцевисті (35Г2, 40Г2, 45Г2, 50Г2 та ін), хромомолібденові (30ХМ, 3ХМА, 35ХМ, 38ХМ), хромонікелеві (40ХН, 45ХН, 30Х3Х0Х3А ХНР) та хромомарганцовистонікелеві з бором (40 ХГНР). Деталі піддають або об'ємному гартуванню з відпуском, або поверхневому гартуванню струмами високої частоти (СВЧ) [5].

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | ДРМТВАТАМ 23.18093.000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 11 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

Для підшипників ковзання (вкладишів, втулок шарнірів та ін) використовуються різні антифрикційні сплави. До них відносяться сплави на мідній, цинковій, алюмінієвій та олов'яно-свинцевій основах. Останні отримали назву бабітів. Зрідка застосовують антифрикційні чавуни із графітними включеннями.

Бабіти та чавуни застосовувалися на початковому етапі розвитку техніки та мають лише історичне значення. У міру зростання потужності двигунів, посилення режиму експлуатації, зниження металомісткості стався перехід до більш твердих підшипникових матеріалів на мідній, цинковій та алюмінієвій основах, добре сумісних зі сталями.

Мідні антифрикційні матеріали поділяються на бронзи та латуні. Бронзи – це сплави міді з оловом та іншими елементами. У них цинк та нікель не є головними легуючими компонентами. Найбільш поширені олов'янисті бронзи. Не основними легуючими елементами є свинець, нікель, фосфор, цинк, залізо та ін.

Найменше поширення, ніж бронзи, набули латуні. Найчастіше як антифрикційні матеріали використовують крем'янисті і марганцеві латуні, а також алюмінієво-залізісті.

Як підшипникові матеріали успішно застосовуються цинкові сплави з легуючими елементами у вигляді міді, алюмінію, магнію. Низька температура плавлення (400 °С) і підвищена розм'якшення забезпечують хорошу опрацювання. З них роблять біметалічні вкладки підшипників ковзання. У сталеву склянку заливається цинковий метал, який рівним шаром покриває внутрішню поверхню. Іншим способом виготовлення вкладишів є штампування їх з біметалічної смуги, що складається зі сталі та цинкового сплаву та одержуваної методом гарячої прокатки. Такі вкладиші використовують у деяких видах тракторних двигунів.

В даний час широкого поширення набули антифрикційні сплави на основі алюмінію. Алюмінієві сплави мають порівняно високу міцність,

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | ДРМТВАТАМ 23.18093.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 12 |

корозійну стійкість, дешеві і недефіцитні, мають низьку щільність і високу теплопровідність. Як легуючі елементи використовуються олово, мідь, нікель, кадмій, кремній, залізо, марганець, титан та інші елементи. Найбільшого поширення набув метал А020-1 (1 %-Са, 20 % - Sn, 0,02 - 0,1% - Ті, інше - Al). Біметалічні вкладиші виготовляються шляхом спільної прокатки з наступним штампуванням. При порушенні режиму гідродинамічного мастила та виникненні металевого контакту на поверхні вкладиша та цапфи утворюється захисна плівка м'якої фази – олова, усередині якої і локалізуються зсувні деформації.

1.1.2 Антифрикційні матеріали, одержувані з порошків та пластмас.

Одним із напрямків отримання антифрикційних матеріалів є створення порошкових антифрикційних композитів. Вироби (втулки, вкладиші підшипників) одержують методом порошкової металургії. Спочатку складається суміш із порошків необхідних речовин, яка після ретельного перемішування пресується у вигляді виробу і спікається. Якщо це необхідно, то здійснюється механічна обробна обробка виробу та насичення пір мастилом. Найбільш поширені матеріали на основі міді та заліза.

Матеріали на основі міді отримали широке застосування через хороші антифрикційні властивості і високу електропровідність, наприклад, в ковзних електроконтактах в щітко-колекторних вузлах електродвигунів і генераторів і т.д. Типовим представником цієї групи є мідно-графітові компоненти із вмістом графіту до 75 %. Для поліпшення властивостей електрощіткових матеріалів додають олово, цинк, свинець. Графіт забезпечує змащування контакту та електропровідність.

Як підшипникові матеріали також використовуються пористі олов'яні бронзи. Вони застосовуються у підшипниках, що працюють у легкому режимі при невеликих швидкостях ковзання (менше 1,5 м/с) та номінальних

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | ДРМТВАТАМ 23.18093.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 13 |

тисках (0,5 – 1 МПа). Завдяки мастилу, що міститься в порах, вони можуть працювати без наповнення олією до 5000 год при температурі від – 60 до +120 °С коефіцієнтом тертя 0,01 - 0,04. Ці підшипники використовуються в малопотужних електромоторах та генераторах, пускових установках ДВЗ. У табл. 1.1 наведено відомості про деякі олов'яні бронзи [5].

Таблиця 1.1 Властивості олов'янистих бронз

| Марка | Масова частка Sn, % | Щільність, кг/м ³ | Пористість, % | Межа міцності, МПа | Твердість НВ, МПа |
|--------|---------------------|------------------------------|---------------|--------------------|-------------------|
| Бр010 | 10 | 6 – 7 | 20 – 30 | 20 – 35 | 60 - 75 |
| SM 100 | 9,5 - 10,5 | 6,4 - 7,2 | --- | 40 - 50 | 100 - 120 |
| SM500 | 10 | 5,6 – 11 | --- | --- | --- |

Зазвичай сталеві стрічки спочатку покриваються електролітичним шаром міді, яку наноситься порошок свинцевої бронзи. Порошок припікається до стрічки у конвеєрній печі. Після припікання проводиться обтиск стрічки методом прокатки. Зі стрічки штамнують заготовлі вкладишів, які потім механічно обробляються. На завершальній стадії електролітичним способом наноситься шар м'якого металу (свинцю, олова, міді, індію).

Аналогічним способом одержують і використовують спечені латуні, складно-леговані бронзи. Крім графіту, як самозмащувальні добавки використовують дисульфід, диселенід, дителлуриди та ін.

Останнім часом за кордоном використовуються металофторопластові матеріали. Вони мають широкий діапазон експлуатаційних властивостей, здатні працювати без мастила в агресивних середовищах, у вакуумі, при температурі від – 200 до + 300 °С. Підшипникові вкладиші складаються із сталеві основи, тонкого припеченого шару високоолов'янистої бронзи (до

0,3 мм), пори якого заповнені сумішшю фторопласту з дисульфідом молібдену.

Крім сплавів на мідній основі, все більшого застосування знаходять антифрикційні алюмінієві сплави. Технологія виготовлення вкладишів така сама, як із використання мідних сплавів. Пори просочуються олією, вводяться твердозмащувальні добавки. У підшипниках автомобільних двигунів застосовуються вкладиші зі сталеві стрічки з припеченим порошком свинцево-оловяного сплаву. Технологія та сама, що з виготовленні вкладишів зі свинцевої бронзи.

Зі збільшенням вмісту графіту покращуються антифрикційні властивості, проте знижується міцність. Зміст графіту зазвичай не перевищує 10% загальної маси. Як легуючі елементи до заліза додають мідь, сірку, фосфор. Мідь підвищує міцність та покращує спікання. Її вміст коливається від 0,5 до 20 % [5].

Застосування залізграфітових підшипників дозволяє заощаджувати велику кількість сплавів кольорових металів, бронзи, бабіту. У ряді випадків залізграфітові підшипники ковзання можуть успішно замінити кулькові та роликові підшипники кочення. Наявність графіту і запас рідкого мастила в порах надають металокерамічним підшипникам властивості самозмащувальних, що зменшує небезпеку виходу з ладу вузлів тертя через недостатнє мастило.

В даний час вирішено задачу виготовлення металокерамічних поршневих кілець для двигунів внутрішнього згорання. Такі поршневі кільця мають більш високу зносостійкість у порівнянні зі звичайними чавунними. Вони працюють до виходу з ладу на 30-45 тисяч кілометрів пробігу автомашин більше, ніж чавунні, і на 30 % менше зношують циліндри двигуна.

Розширюється також застосування пористих спечених підшипників, просочених фторопластом. Такі підшипники дуже перспективні для опор

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | ДРМТВАТАМ 23.18093.000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 15 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

ковзання, що працюють без мащення (рис. 1.1), завдяки високим антифрикційним властивостям фторопласту. Коефіцієнт тертя підшипників, просочених фторопластом, без мастила становить приблизно 0,05. Вони надійно працюють при температурах до 280 °С у кислих та лужних середовищах.



Рисунок 1.1 – Опори ковзання.

Розроблено антифрикційні спечені матеріали для підшипників газових та парових турбін, що працюють за високих температур. Для отримання цих деталей використовують порошки хромонікелевих сталей типу Х18Н15 ХЗН18 з добавками в шихту дисульфиду молібдену. Спечені матеріали мають щільність, що перевищує 90% [5]. Нижча вартість пористих спечених підшипникових матеріалів порівняно з бронзою та бабітом стимулює подальший розвиток цього напрямку розробки триботехнічних матеріалів та технологій.

| | | | | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | Арк. |
| | | | | | | | | | 16 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | ДРМТВАТАМ 23.18093.000 ПЗ | | | | |

1.2 Методи отримання зносостійких покриттів.

Дуже перспективна можливість значного поліпшення фрикційно-зносних характеристик деяких пар тертя при граничному мащенні за рахунок реалізації ефекту вибіркового переносу, відкритого Д. Н. Гаркуновим та І.В. Крагельським у 1965 році. Слід зазначити ще дві роботи трибологів, також удостоєних дипломами за відкриття: ефекту аномально низького тертя при бомбардуванні ядрами гелію деяких матеріалів (А. А. Силін, М. А. Тальрозе, Є. А. Духовський та ін.) та явища водневого зношування (А. А. Поляков, Д. Н. Гаркунов) [7].

Питання розвитку триботехніки можна поділити на такі частини, які містять самостійні етапи:

- 1) вчення про тертя та зношування деталей машин;
- 2) конструктивні вирішення питань тертя та зношування;
- 3) технологічні методи підвищення зносостійкості деталей;
- 4) експлуатаційні заходи щодо підвищення довговічності машин.

Важливим завданням триботехніки є розробка методів боротьби з водневим зношуванням [7, 8]. Експериментально виявлено невідоме раніше явище концентрації в поверхневих шарах деталей, що труться, водню що виділяється з матеріалів пари тертя і з навколишнього середовища. Це викликає прискорення зношування. Водневе зношування характеризується інтенсивним виділенням водню в результаті трибодеструкції водневмісних матеріалів, що прискорюється механохімічною дією. Крім того, воно характеризується дифузією водню в шар сталі, що деформується, і особливим видом руйнування, пов'язаним з одночасною появою великої кількості «зародків» тріщин у всій зоні деформування, і згаданим накопиченням водню. Водневе зношування вносить нові уявлення про механізм крихкої руйнації.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | ДРМТВАТАМ 23.18093.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 17 |

Захист від водневого зношування має особливе значення і в авіатехніці (вузли тертя паливних насосів, а також гальмівні колодки та барабани коліс виходять з ладу внаслідок водневого зношування). В авіаційній техніці розширюється застосування титану та його сплавів, при терті ці матеріали, володіючи низькими антифрикційними властивостями, дуже поглинають водень і піддаються зношування водню.

До останнього часу генеральним напрямом боротьби з зношуванням в машинобудуванні було підвищення твердості поверхонь деталей, що труться. У промисловості розроблено велику кількість методів підвищення твердості деталей (хромування, азотування, цементування тощо). Багаторічний досвід свідчить, що цей напрямок дозволило більшою мірою підвищити надійність деталей машин, що труться. Однак постійне прагнення зменшення маси машин і підвищення інтенсифікації робочих процесів призвело до збільшення тисків у вузлах машин і швидкостей ковзання і погіршило умови змащування. Крім того, вимоги до підвищення ККД механізмів, а також застосування спеціальних мастильних матеріалів та рідин призвело до того, що традиційні методи збільшення зносостійкості деталей підвищенням їхньої твердості у багатьох випадках перестали себе виправдовувати. У процесі пошуку засобів збільшення зносостійкості деталей машин відкрито вибіркоче перенесення при терті.

Технологічні методи є актуальним напрямом підвищення зносостійкості деталей та забезпечення фрикційних властивостей пар тертя.

Методи отримання покриттів у вакуумі можна поділити на термічні, газофазні та іонно-плазмові.

Термічні методи засновані на конденсації молекулярних та атомарних пучків матеріалу, які отримуються в результаті резистивного, електронно-променевого або лазерного нагріву [9, 10]. Продукти випаровування, що складаються з атомів, молекул та мікрокрапельної фази, ізотропно розлітаються над поверхнею мішені і, потрапляючи на поверхню підкладки,

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | ДРМТВАТАМ 23.18093.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 18 |

конденсуються. В силу теплової природи процесу випаровування енергія частинок, що конденсуються, не перевищує 0,3 еВ, а ступінь іонізації продукту випаровування практично дорівнює нулю. Структура та фізико-механічні властивості покриттів регулюються температурою основи, швидкістю конденсації пари та ступенем вакууму. У процесі конденсації температура основи має бути не нижчою (0,3-0,5) температури плавлення покриття. Цими методами одержують покриття з металів, неметалів, напівпровідників та інших сполук. Методи газофазного осадження (ГФО) засновані на подачі в тепловий реактор летких сполук металів (в основному хлоридів) у суміші з воднем та добавками азоту, метану та кисню. У зарубіжній літературі цей метод названо CVD (Chemical Vapour Deposition)-хімічне парове осадження. За допомогою цього методу можна отримати покриття або з чистого металу, або з його сполук з азотом, вуглецем або киснем. Основна умова одержання покриття - підтримка температури на рівні, що перевищує температуру розкладання хлориду металу в атмосфері водню. Однак для отримання якісних покриттів із сполук (нітридів, карбідів та оксидів) необхідна підтримка температури основи на рівні, що перевищує $0,3T_{пл}$ цих сполук, тобто. вище 600-800 °С. Тому метод ДФО малоприматний для обробки більшості конструкційних машинобудівних матеріалів.

Вакуумні іонно-плазмові методи універсальні по можливості отримання широкої гами моношарових, багат шарових та багатокомпонентних покриттів на базі нітридних, карбідних, карбонітридних, оксидних, борідних та інших сполук тугоплавких металів IV-VI груп Періодичної системи елементів Д. І. Менделя [9, 10].

При вакуумному іонно-плазмовому осадженні покриттів важливу роль відіграють іони або плазма. Плазма активує плазмохімічні реакції між атомами металу та реактивного газу або сприяє утворенню іонів компонентів металу або газу, потік яких впливає на підкладку перед та в процесі осадження покриття. Перед нанесенням покриття на підкладку впливають

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | ДРМТВАТАМ 23.18093.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 19 |

високоенергетичні частинки, що підвищує міцність зчеплення покриття з основою, а також впливає на структуру, щільність покриття та величину внутрішніх напруг. За допомогою цих методів можна наносити покриття за низьких температур підкладки, що найбільш перспективно для інструментів зі швидкорізальних сталей.

Іонно-плазмові методи зручно розділити на три групи, взявши за основу ознаку, з якої фази (атомарної, іонної чи плазмової) відбувається формування покриття. У свою чергу, кожен групу можна розділити на підгрупи з технічної реалізації методу. За фазою речовини для отримання покриттів методи поділяють на іонне розпилення (cathode sputtering), іонне осадження (ion plating), плазмове напilenня (ion bond) [9, 10].

Методи іонного розпилення прийнято поділяти в основному на катодне та магнетронне розпилення. У цих способах мета, зроблена з матеріалу покриття, розпорошується при бомбардуванні позитивними іонами високої енергії в плазмі розряду допоміжного газу. Продукти розпилення, що складаються з атомарної фази речовини мішені, осідають на поверхню основи та утворюють покриття. Системи розпилення класифікують за кількістю електродів (діодні, тріодні, тетродні), виду напруги, що використовується (постійна, високочастотна), наявності або відсутності потенціалу на підкладці (зі зсувом, без зміщення).

У найпростішому випадку система розпилення і двох електродів, поміщених у вакуумну камеру (рис. 1.2). Розпорошувану мішень 1 розташовують на катоді, але в іншому електроді з відривом кілька сантиметрів від катода встановлюють вироби (підкладки). Між двома електродами підтримується самостійний розряд газу, що тліє, на постійному або високочастотному струмі. Атоми мішені, розпорошені іонами газу, прямують до підкладки і, беручи в облогу на ній, утворюють покриття.

Удосконалення катодних розпилювальних систем дозволило створити звані магнетронні розпилювальні системи [9, 10]. Головна відмітна ознака

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | ДРМТВАТАМ 23.18093.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 20 |

магнетронних систем - наявність під мішенями магнітів, аркового магнітного поля над мішенню.

При діодному розпорощенні постійного струму розряд підтримується за допомогою вторинних електронів, випущених катодом під впливом іонного бомбардування. Електрони, що не зустрічають молекул газу, відходять від катода в перпендикулярному напрямку та захоплюються анодом (рис. 1.3, а).

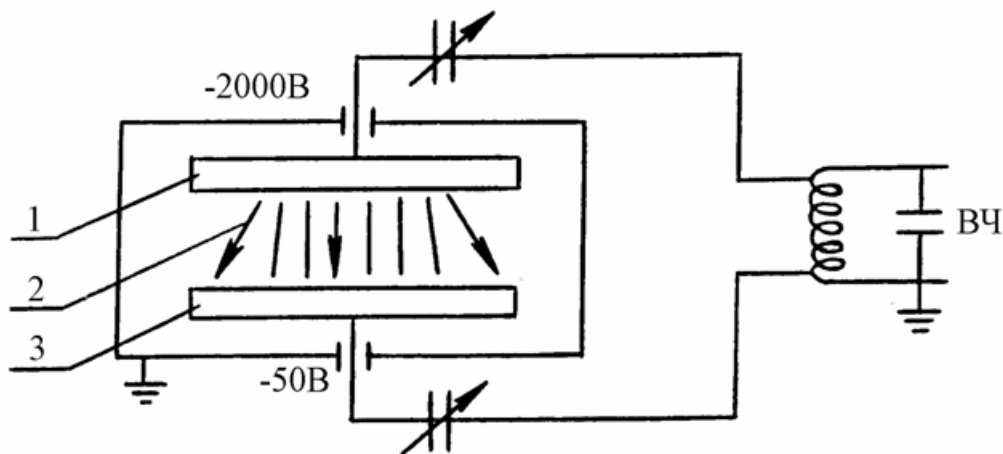


Рисунок 1.2 – Діодна схема іонного розпилення з високочастотним (ВЧ) розрядом:

1-мішень; 2-розпилений матеріал; 3-підкладка.

Якщо над електричним полем перпендикулярно розташувати магнітне поле, тобто. паралельно катоду та дуже близько від нього (рис 1.3, б), то електронні траєкторії обвиваються навколо лінії магнітного поля, що значно збільшує можливості іонізації газової молекули поблизу катода. Ефективність іонізації вторинних електронів, випущених катодом, підвищується завдяки подовженню їхньої траєкторії.



Рисунок 1.3 – Механізм магнетронного ефекту. а - діодна система; б- магнетронна система.

Іонна густина зростає в зоні, близької від катода, де іони легше притягуються катодом, що призводить до збільшення швидкості напilenня.

Розрізняють дві геометричні форми магнетронів:

- плоскі (круглі та прямокутні);
- циліндричні (стрижневі катода та порожнисті циліндричні магнетрони);

Конструкція круглого магнетрону показано на рис.1.4.

Методи іонного осадження розвивалися у зв'язку з необхідністю підвищення міцності зчеплення покриттів, одержуваних термічними методами, а також збільшення продуктивності та швидкості зростання покриттів, одержуваних методами іонного розпилення [9]. Метод іонного осадження вперше запропоновано Д. М. Меттоксом у 1974 [10]. Сутність його полягає у випаровуванні матеріалу, подальшій іонізації та прискоренні у напрямку до поверхні деталі під дією прикладеного до неї негативного потенціалу.

Випаровування металу відбувається найчастіше електронним променем в атмосфері тліючого розряду, який збуджується між катодом-підкладкою та

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | ДРМТВАТАМ 23.18093.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 22 |

анодом-випарником. На підкладку подається негативний потенціал завбільшки 1-5 Кв.

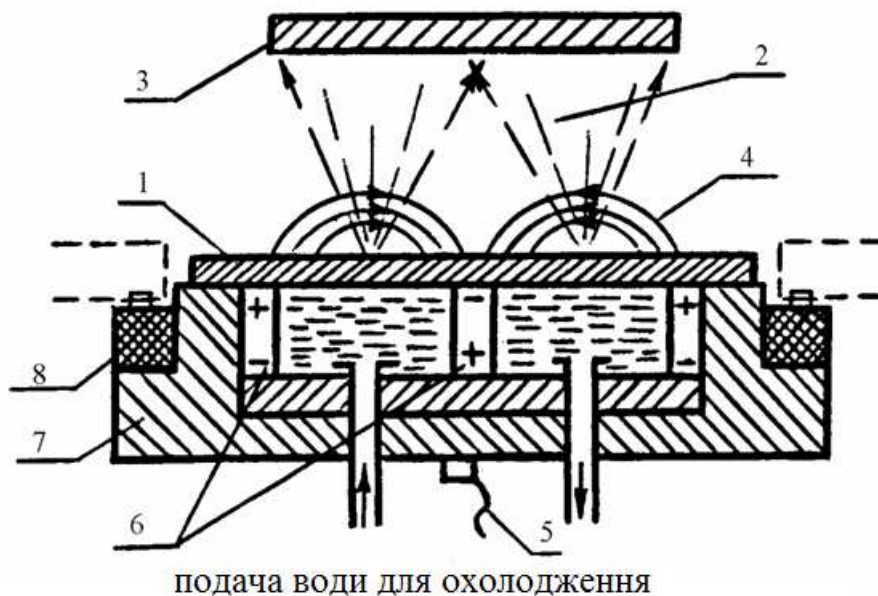


Рисунок 1.4 – Конструкція круглого магнетрону:

1-мішень; 2-розпилений матеріал; 3-підкладка; 4 магнітне поле; 5- висока напруга; 6 постійні магніти; 7 - корпус; 8-ізолятор.

На рис. 1.5 показана схема установки іонного осадження з тріодною системою та високовольтною електронно-променевою гарматою. Випаровування матеріалу мішені 1 здійснюється променем 2 високовольтної електронно-променевої гармати 3, електрони, що випускаються катодом 4, що розжарюється, і розплавом матеріалу, прискорюються у напрямку до додаткового електроду - аноду 5 і іонізують випаровується матеріал. Нейтральні атоми та іони пари осідають на поверхню основи 6, утворюючи покриття.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | ДРМТВАТАМ 23.18093.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 23 |

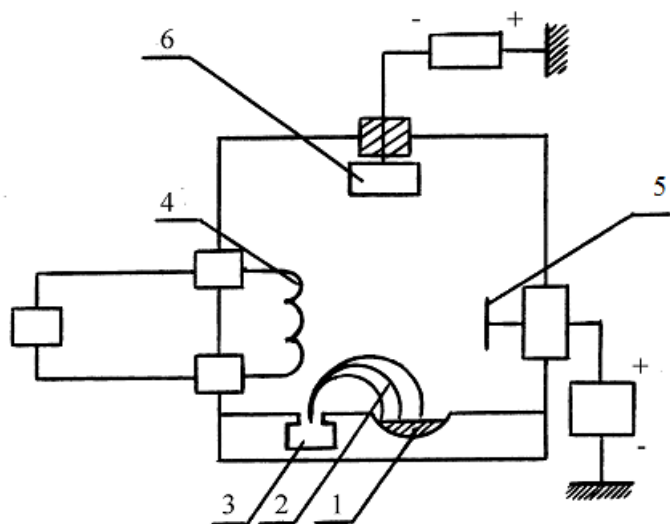


Рисунок 1.5 – Схема встановлення іонного осадження з тріодною системою та додатковою іонізацією пароподібного матеріалу, що випаровується променем електронно-променевої гармати.

За допомогою цього методу одержують покриття з металів, а також їх нітридів та карбідів. Основним недоліком цього методу є використання дорогого високовольтного обладнання для отримання електронного променя, а також травлення поверхні основи перед напиленням, наприклад, на стадії попереднього очищення на виріб може подаватися негативний потенціал до 15 Кв [9].

Якщо при іонному осадженні вдається іонізувати 10-40 % атомів пари, то за дугового випаровування матеріалів катодною плямою вакуумної дуги ступінь іонізації металевої плазми досягає 50-90 % (див. табл. 1.2) [10, 11]. З цього випливає, що із застосуванням дугового методу можна досягти більшого ефекту порівняно з іншими методами.

Методи отримання покриттів за допомогою пристроїв для випаровування дугового матеріалів отримали назву методів плазмового напилення у вакуумі. Одним з цих методів, що набув найбільшого поширення, є метод КІБ (конденсація покриттів з плазмової фази у вакуумі з іонним бомбардуванням), при якому на підкладку виявляється вплив

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | ДРМТВАТАМ 23.18093.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 24 |

високоенергетичних частинок, що забезпечують очищення поверхні перед нанесенням покриття і підвищують міцність зчеплення покриття з підкладкою.

Таблиця 1.2 – Основні параметри, що характеризують установки для нанесення покриттів у вакуумі [11].

| Метод нанесення покриттів | Питома швидкість випаровування (розпилення), г/(см ² с) | Ефективність процесу випаровування (розпилення), г/Дж | Ступінь іонізації, % | Енергія часток, що генеруються, Дж | Швидкість осадження, нм/с | Енергія осаджуваних частинок, Дж | Робочий тиск, Па |
|----------------------------------|--|---|----------------------|------------------------------------|---------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|
| Іонно-плазмовий (електродуговий) | 2•10 ⁻⁴ - 5•10 ⁻³ | 2•10 ⁻⁶ - 10 ⁻⁵ | 10- 90 | (1,6-16) •10 ⁻¹⁸ | 5 | - | - |
| Магнетронне розпилення | (4-40) •10 ⁻⁵ | 3•10 ⁻⁶ | - | (1,6-3,2) •10 ⁻¹⁸ | 10-60 | (0,32 - 16) •10 ⁻¹⁹ | (5-50) •10 ⁻² |
| Високочастотне розпилення | 2•10 ⁻⁷ - 2•20 ⁻⁶ | 6•10 ⁻⁷ | - | (16-320) •10 ⁻¹⁹ | 0,3-3 | (0,32- 32) •10 ⁻¹⁹ | 0,5- 2,0 |

Метод КІБ (рис.1.6) розроблений Харківським інститутом АН України [12] і заснований на тому, що плазмовий потік металу, що утворюється за допомогою вакуумної дуги з холодним катодом, прискорюється шляхом

застосування негативного потенціалу до підкладки з подальшою конденсацією на ній іонів та нейтральних атомів при одночасному проходженні плазмо-хімічної реакції з реактивним газом. За допомогою цього методу можна наносити покриття самих металів, так і їх хімічних сполук типу нітридів, карбідів, боридів, оксидів, сульфідів, тугоплавких металів.

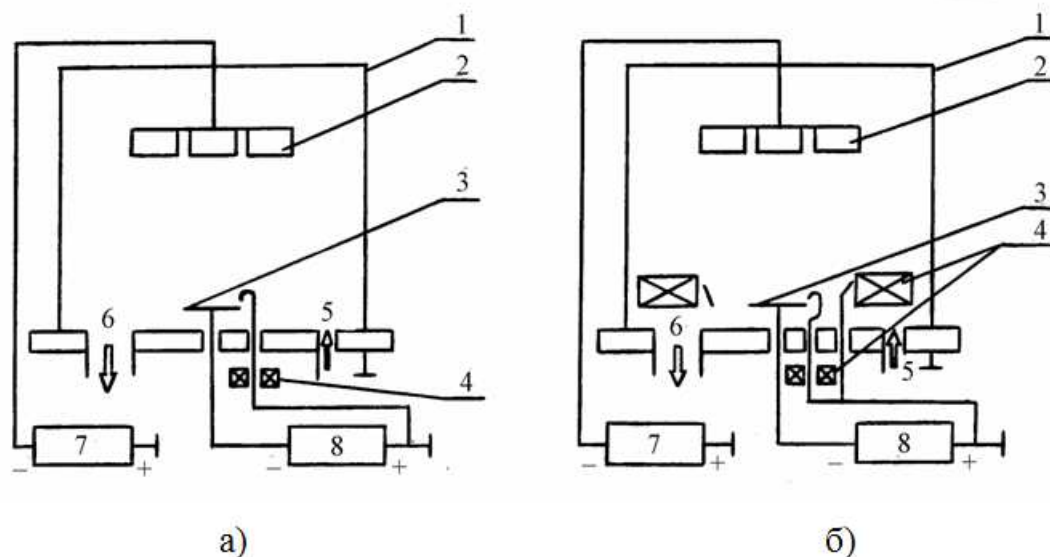


Рисунок 1.6 – Схема встановлення вакуумного іонно-плазмового методу:
 а-вакуумно-плазмова установка звичайного типу; б-вакуумно-плазмова установка з плазмооптичною системою; 1-вакуумна камера (анод); 2- підкладка; 3- випарник (катод); 4-електромагніти; 5- подача реакційного газу; 6 - до вакуумного насоса; 7 - джерело живлення для подачі негативного потенціалу до підкладки; 8 - джерело живлення дуги.

При високому потенціалі підкладки (1кВ і вище) прискорені іони частково розпоршують поверхневий шар підкладки та одночасно впроваджуються в підкладку та насичують тонкий приповерхневий шар, що забезпечує надійну адгезію покриття до підкладки [12].

Основним вузлом вакуумно-плазмової установки є електродуговий випарник, де випаровування металу з поверхні катода відбувається завдяки високій концентрації енергії в катодній плямі електричної дуги.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | ДРМТВАТАМ 23.18093.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 26 |

Для нормальної роботи електродугового випарника необхідно підтримувати катодні плями на поверхні катода, для чого застосовується магнітне поле.

Істотне розширення технологічних можливостей електродугових випарників пов'язане з додатковим накладенням на потік плазми електромагнітного поля (рис. 1.7) [13]. При накладенні зовнішнього магнітного поля, що аксіально розходиться, реалізується режим плазмового прискорювача (холовський торцевий плазмовий прискорювач).

У прискорювачі є дві зони - зона генерації (область катодних мікроп'ят), де процеси не залежать від магнітного поля і визначаються лише видом матеріалу катода, і зона прискорення, на процеси якої сильно впливає магнітне поле. Холовський метод реалізовано на установці моделі "Пуск", призначеної для нанесення зносостійких покриттів [13].

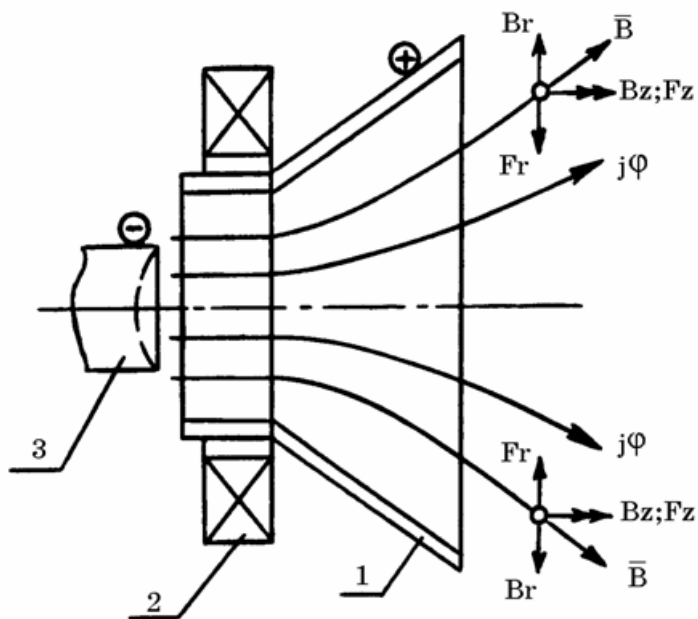


Рисунок 1.7 – Холовський торцевий прискорювач:

1-анод; 2-електромагнітна котушка; 3-катод; B_r і B_z - радіальна і аксіальна компоненти магнітного поля, що аксіально розходиться; $j\phi$ - азимутальний холівський струм; F_z - сила, що призводить до ефектів фокусування плазмового струменя по осі системи, $F_z = j\phi B_r$; F_r - сила, що призводить до ефектів до прискорення плазми, $F_r = j\phi B_z$.

Основні переваги вакуумного іонно-плазмового методу (КІБ):

- Можливість точного регулювання швидкості нанесення покриттів, шляхом зміни сили струму дуги;
- Можливість регулювання фазового та хімічного складу покриттів, використовуючи катоди з різних матеріалів або складові (багатокомпонентні);
- Висока адгезія покриттів до основи за рахунок високої енергії плазмового струменя;
- високий ступінь іонізації сприяє ефективній агломерації зародків та формуванню суцільних плівок мінімальних товщин;

Таблиця 1.3 – Характеристики іонно-плазмових установок [9, 10, 13]

| Тип установки | VH, мкм/хв | $\tau_{II} \cdot 10^2$, с | t _u , °C | пц, шт | Розміри камери, мм | | N _y , кВт | Організація, розробник |
|-----------------------|------------|----------------------------|---------------------|--------|--------------------|-----|----------------------|------------------------|
| | | | | | D | h | | |
| ІЕТ-8І | 0,075 | 10,5 | 330-800 | 3 | 900 | 500 | 60 | - |
| Пуск79-1* | 0,05-0,13 | 1,2-1,6 | 330-800 | 1 | 360 | 450 | 40 | - |
| "Булат-3Т" | 0,05-0,13 | 10,8 | 330-800 | 3 | 500 | 500 | 47 | ХФТІ м. Харків |
| ННВ-6.6-ІІ (Булат-20) | 0,13-0,50 | - | 330-800 | 3 | 600 | 600 | 27 | ВНДІЦЕ СКБ |
| "Булат-6" | 0,25-0,83 | - | - | 3 | 500 | - | 48 | - |
| Пуск-79 * | 0,5-1,0 | - | - | 2 | 360 | 450 | 16 | НДІТ |
| Пуск-83 * | 0,4-0,8 | - | - | 2 | 300 | 400 | 15 | НДІТ |

Закінчення таблиці 1.3.

| | | | | | | | | |
|---------------------------|---------------|---|---|---|------------|----------|----|--------------------------------------|
| ННВ 9,5-ІІ (Булат-21) | 0,13- 0,50 | - | - | 4 | 900 | 500 | 35 | ВНДІЕТО |
| ННВ 6.10-ІІ (Булат-22) | 0,13- 0,50 | - | - | 4 | 600 | 100 0 | 35 | ВНДІЕТО |
| ІЕТ-8-І2 (Булат-23) | 0,13- 0,50 | - | - | 2 | 900 | 500 | 20 | ВНДІЦЕ |
| Булат-2-УЗ | 0,08- 0,30 | - | - | 3 | 600 | 600 | - | Укроргсман кін пром, м. Харків |
| Юніон | 0,50- 0,80 | - | - | 2 | 600 | 600 | 20 | НВО "Ритм", м. Білгород |
| ВУ-15 | 0,30- 0,50 | - | - | 1 | 600 | 540 | 15 | СМЗ |
| Титан 14 | - | - | - | 4 | V = 0,4 м3 | | - | ДФВТ, Болгарія |
| Титан 17 | - | - | - | 7 | V=1м3 | | - | ДФВТ, Болгарія |
| Титан 22* | - | - | - | 2 | V=0,4м3 | | - | ДФВТ, Болгарія |

* Двокамерна установка.

Примітка: VH - швидкість нанесення покриття; τ_{II} - повний час процесу; t_v - температура виробу; V - об'єм камери; n_v - кількість випарників; h, D - висота та діаметр камери відповідно; N_u - потужність установки; ДФВТ – Державна фірма вакуумних технологій (Болгарія).

| | | | | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|--|--|--|------|
| | | | | | ДРМТВАТАМ 23.18093.000 ПЗ | | | | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | | | | 29 |

- Можливість отримання покриттів сполук металів (нітридів, карбідів, оксидів та ін), вводячи в камеру реакційний газ;

- Використання ЕОМ для управління технологічним процесом нанесення покриттів.

Нині у промисловості використовується кілька модифікацій іонно-плазмових установок, деякі характеристики яких наводяться у табл. 1.3.

Основними технічними характеристиками іонно-плазмових установок є: швидкість осадження - VH ; тривалість процесу - τ_{II} ; температура підкладки (виробу) - t_u ; потужність установки- N_u ; розміри вакуумної камери- h та D ; кількість випарників- n_u .

Основні відмінності наведених моделей полягають у швидкості випаровування матеріалу катода, кількості, формі та розмірах вакуумних камер, кількості та розташування електродугових випарників по камері установки.

Найкращими можливостями швидкості нанесення покриттів можна виділити установку "Пуск-79".

Установки ННВ6.10-ІІ (Булат-22) та "Титан-17" призначені для нанесення покриття на довгомірні деталі. На установці "Титан-17" можна наносити рівномірні покриття на деталі довжиною до 1,5 м [14], в якому мережа випарників розташована по двох протилежних утворюючих циліндра: три з одного боку і чотири з іншого, сторони - відповідно в шаховому порядку.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | ДРМТВАТАМ 23.18093.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 30 |

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ФРИКЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОКРИТТІВ

2.1 Особливості формування тонкоплівкових вакуумних покриттів.

Серед електрофізичних способів отримання тонких покриттів, що мають підвищену фретинг-корозійну стійкість, ефективним є метод іонного осадження з плазми дугового розряду, тобто, метод конденсації з іонним бомбардуванням (КІБ). Обладнання для реалізації цього методу має низку переваг – це, перш за все, висока продуктивність та екологічна чистота процесу конденсації; можливість отримання конденсатів широкого кола матеріалів та структурних станів у високому вакуумі; високі енергії іонів, що конденсують, обумовлюють широкі адгезійні властивості одержуваних конденсатів, їх простоту і т.д. Недоліком цього методу є сильна залежність експлуатаційних властивостей отриманих покриттів від параметрів технологічного процесу їх нанесення (тиску азоту, напруги зміщення, температури підкладки та ін), які прямо чи опосередковано впливають на хімічний склад, структуру, механічні та трибологічні властивості покриттів. Причому в ряді робіт зазначається, що структура якості покриттів та параметри процесу їх осадження пов'язані складним, безнадійно заплутаним чином [14].

Для підвищення стійкості ріжучого інструменту широко застосовують покриття нітриду титану, одержувані шляхом іонно-плазмового осадження з парової фази, зокрема методом КІБ (конденсація покриттів з плазмової фази з іонним бомбардуванням поверхні).

Іонно-плазмові покриття нітриду титану мають дуже високу твердість ($HV = 16...30$ ГПа [15-16]), що перевищує в 1,13...2,5 і 2,3...4,3 рази твердість твердих сплавів і швидкорізальних сталей відповідно. В результаті нанесення покриттів нітриду титану значно зменшується сила тертя і температуру в зоні

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | ДРМТВАТАМ 23.18093.000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 31 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

контакту, послаблюється адгезійна взаємодія поверхонь, що труться, знижується енергія утворення стружки. Всі ці фактори призводять до збільшення стійкості ріжучого інструменту в 2 ... 10 разів і більше [15-16].

Фізичні та механічні властивості покриттів нітриду титану більшою мірою залежать від різних параметрів їх отримання, зокрема від тиску реактивного азоту. У літературі наводяться різні дані за величиною pN (тиск реактивного азоту), що відповідає максимальній стійкості інструменту з покриттям нітрид титану: $6,6 \cdot 10^{-1}$ - 1,3 Па; 0,4 - 0,8 Па; 2,6 Па; $2 \cdot 10^{-2}$ - $5 \cdot 10^{-2}$ Па. Найкращими трибологічними характеристиками має зразок з покриттям, обложеним при тиску азоту $pN = 6,7$ Па. Від величини pN залежать хімічний та фазовий склад, текстура, напружений стан і відповідно твердість та зносостійкість [15-16].

Аналіз впливу тиску азоту pN на хімічний і фазовий склад покриття нітриду титану показав, що максимальна твердість відповідає з'єднанню Ti_2N [18] або структурі, що включає, крім Ti_2N , нітрид стехіометричного TiN [15-16] або нестехіометричного TiN_x (наприклад, $TiN_{0,6}$, $TiN_{1,05}$) складу. Крім того, у покритті зазвичай присутній металевий α - Ti («краплинна фаза»), кількість якого зменшується зі збільшенням pN . Зниження твердості при нестачі азоту пов'язане саме з великою кількістю α - Ti (до 30 % при $pN \leq 910$ –1 Па). При осадженні покриттів методом КІБ $pN \geq 2 \cdot 10^{-1}$ Па отримане покриття містить стехіометричний нітрид титану TiN (основа) та деяку кількість краплинної фази α - Ti та інших фаз (наприклад, карбідів та карбонітридів титану). Вважається, що металева фаза збільшує схильність до захоплення з оброблюваним матеріалом, зменшує стійкість зміцненого інструменту [15-16]. Встановлено, що кількість металевого титану в структурі покриття падає зі збільшенням тиску азоту до нуля при $pN \geq 5 \cdot 10^{-1}$ Па або $pN = 20$ Па, за даними роботи [14], при $pN \approx 1,3 \cdot 10^{-1}$ Па вміст α - Ti становить 1...2 %.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | ДРМТВАТАМ 23.18093.000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 32 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

Виходячи з цих даних, можна вважати, що максимальна зносостійкість, характерна для зразка з покриттям нітриду титану, обложеном при $pN = 6,7$ Па, пояснюється практично повною відсутністю краплинної металевої фази в структурі. Стехіометричний TiN, що має меншу твердість, ніж Ti_2N , забезпечує оптимальне поєднання твердості і опору тендітному руйнуванню і відповідно високу зносостійкість [14].

При отриманні монопокриттів іонно-вакуумними методами поверхнева мікротвердість визначається складом і структурним станом покриття. При отриманні карбідних, нітридних сполук поверхнева мікротвердість покриття в основному визначається тиском реактивного азоту. Твердість залежить не тільки від тиску азоту, а й потенціалу зміщення, матеріалу і температури підкладки, оскільки ці параметри процесу осадження впливають (різною мірою) на розмір зерна, морфологію, щільність дефектів, пористість, рівень залишкових напружень [14].

Покриття нітриду титану, одержуване при конденсації іонів титану в атмосфері іонізованого азоту, переважно складається з нітриду титану і деякої кількості Ti- α , що залежить від тиску азоту, при якому синтезується покриття. Відповідно до діаграми стану Ti - N при температурі нижче 1323 К, тобто. в інтервалі напilenня нітридних покриттів, крім δ -фази (TiN), може існувати ϵ -фаза (Ti_2N), що має тетрагональну кристалічну решітку та вузьку область гомогенності. Нітрид титану – фаза впровадження δ (TiN) – має гранецентровану кубічну решітку типу NaCl. Нітрид титану має широку область гомогенності і може розглядатися як розчин застосування з надлишком атомів у решітці TiN. Від ступеня заповнення азотом октаедричних пір залежить мікротвердість нітрида титану. Однак залежно від ступеня іонізації, енергії плазми, в кінцевому рахунку, і температури плазми плазмохімічна реакція протікатиме з різними швидкостями, і отримані структура, склад і мікротвердість покриття будуть різні. Таким чином,

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | ДРМТВАТАМ 23.18093.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 33 |

поверхнева мікротвердість покриттів TiN визначається тиском реактивного газу і температурою ведення процесу.

Склад та структурний стан покриття впливають на характер руйнування його в процесі тертя. За браку азоту, тобто. при утворенні Ti₂N, відбувається руйнування покриття за механізмом крихкого розтріскування. При тиску азоту, що відповідає освіті приблизно стехіометричного складу нітриду титану TiN, зношування покриття відбувається за окислювальним механізмом. При тиску азоту, що відповідає надстехіометричному вмісту азоту в покритті при терті, поряд з окислювальним спостерігається і механізм руйнування.

У роботі [18] на основі аналізу експериментальних результатів показано, що максимум зносостійкості фіксується при тисках азоту (2...5) 10⁻² Па. Це збігається з екстремальними значеннями твердості (30 ... 32 гПа) і пов'язано з появою в структурі динітриду титану. Металографічні дослідження показали, що Ti₂N утворюється на межі контакту краплинної фази (неіонізованого азотом α-Ti) з нітридом титану, дефектним по азоту (25...42 ат. % N₂) в результаті твердофазної реакції TiN_{2-x} + α-Ti → Ti₂N. Крапельна фаза, присутня в такому покритті в помітних кількостях (таблиця 2.1), що не впливає на адгезійне схоплювання з контртілом при терті на повітрі. Провокуючи твердо-фазну реакцію, частки α-Ti частково або повністю перетворюються на динітрид титану, зміцнюючи покриття. У зв'язку з цим твердість краплинної фази зростає до 18...32 гПа.

Таким чином, можна зробити висновок, що покриття нітриду титану зменшує коефіцієнт тертя, швидкість зношування, ваговий знос і підвищує зносостійкість зразків. Максимум твердості покриття КІБ не збігається з максимумом зносостійкості при різанні і відповідає максимуму зносостійкості при терті ковзання без мастила, що характерно для штампів холодного деформування та інших важконавантажених деталей машин. При цьому краплинна фаза не є від'ємним фактом. Отримання в покритті нітриду

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | ДРМТВАТАМ 23.18093.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 34 |

титану нестехіометричного складу (зміст азоту в TiN 35...45%) дозволяє забезпечити високий комплекс властивостей у покриттях, нанесених методом КІБ.

Таблиця 2.1 – Хімічний та фазовий склад покриттів залежно від тиску азоту в камері.

| Тиск азоту, Па | Вміст азоту, ат. % | Кількість крапельної фази (α -Ti), % | Фазовий склад |
|-------------------|-----------------------|---|------------------------------------|
| 2 | 44 | 5 | TiN |
| $5 \cdot 10^{-1}$ | 53 | 7 | TiN |
| $5 \cdot 10^{-2}$ | 48 | 15 | TiN + α |
| $2 \cdot 10^{-2}$ | 43 | 25 | TiN + α + Ti ₂ N |
| $9 \cdot 10^{-3}$ | 35 | 30 | Ti ₂ N + α + TiN |

Формування комбінованих покриттів.

Останнім часом велике застосування знаходять комбіновані покриття, так, наприклад, у роботі [18] було досліджено покриття TiN та мультишарове смугасте покриття (Cu + TiN)_x. Авторами роботи [19] на підставі проведених досліджень було запропоновано в трибовузлах, що працюють без мастила, покриття з нітриду титану облягати на обидві деталі пари тертя; процес зношування у разі носить абразивно-втомний характер. При терті поверхні зразків з покриттям по контртілу із загартованої сталі має місце інтенсивне окислювальне зношування контртіла, що супроводжується значними коливаннями величини моменту і коефіцієнта тертя, тому оптимальним для цього класу пар тертя є мультишарове покриття (Cu + TiN)_x. Процес зношування зміцнених деталей визначається видом та товщиною покриття, жорсткістю матеріалу підкладки та її вихідною шорсткістю. Для забезпечення високої зносостійкості деталей при терті без мастила товщина

| | | | | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | Арк. |
| | | | | | | | | | 35 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | ДРМТВАТАМ 23.18093.000 ПЗ | | | | |

покриття повинна бути $\geq 5...7$ мкм. З зменшенням вихідної шорсткості поверхні тертя від $Ra = 0,6 \dots 0,75$ мкм до $Ra = 0,11 \dots 0,14$ мкм зносостійкість покриття збільшується в 1,8 ... 2,1 рази, а коефіцієнт тертя зменшується в 1,2 ... 1,4 рази. При терті без мастила мультишарове покриття (Cu + TiN)х ефективніше покриття TiN за рахунок реалізації ротапринтного методу змащування, а також більшої стійкості ультрадисперсної шаруватої структури до процесів крихкого руйнування, що носить стохастичний характер, і меншої глибини руйнування при схопленні.

Результати дослідження впливу умов нанесення конструкції багат шарових покриттів на основі нітриду титану на їх триботехнічні характеристики при терті без мастильного матеріалу та в середовищі дизельного палива показали, що найбільш високі характеристики мають покриття з послідовно розташованими шарами нітриду титану, міді та політетрафторетилену (ПТФЕ). Для таких покриттів інтенсивність зношування пари тертя "сталь - покриття" на порядок менше порівняно з парою "сталь - сталь", а коефіцієнт тертя зменшується з 0,35 до 0,15.

Тонкі фторопластові покриття, сформовані з розчинів та іонно-електронно-плазмовими методами, можуть бути успішно використані при вирішенні широкого кола технічних завдань. При цьому важливим є знання специфічних властивостей тонких полімерних шарів, їх поведінки при різних зовнішніх впливах, структурних і релаксаційних змінах в матеріалах. Відзначимо, що внаслідок технологічних особливостей процесу осадження покриття з розчинів і газової фази тонкі шари полімеру на початкових стадіях знаходяться, як правило, в термодинамічно нерівноважному метастабільному стані. Практично завжди має місце суттєва зміна у часі фізико-хімічних властивостей сформованих покриттів.

Електронно-мікроскопічні дослідження морфологічних особливостей полімерних плівок показали, що в залежності від природи полімеру, режиму та умов перебігу процесів перенесення на стадіях диспергування мішені та

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | ДРМТВАТАМ 23.18093.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 36 |

транспортування продуктів розпилення в газовій фазі можливо формування різних структур, від орієнтованих двовимірних до краплеподібних з різним розміром утворень. Встановлено, що полімерні плівки, що з високою точністю відтворюють мікрорельєф поверхні підкладки, формуються при відносно невисоких швидкостях зростання і, що особливо важливо, якщо процес диспергування полімеру протікає без утворення бульбашок у поверхневому шарі. Такі умови реалізуються, наприклад, для формування плівок ПТФЕ електронно-променевим диспергуванням. Якщо ж поверхня підкладки є неоднорідною, такі плівки починають рости на областях з вищою поверхневою енергією і мають орієнтацію в межах однорідної області підкладки. При розпиленні таких полімерів, як поліуретан, полікарбонат та ін, як правило, в поверхневих шарах утворюються бульбашки з летких продуктів, і на поверхні підкладки осаджується покриття, що складається з рівномірно розподілених дисперсних сфероподібних утворень розміром 2 ... 6 мкм. Встановлено, що у випадках структура покриття мало залежить від природи підкладки. Якщо поверхня, що покривається, знаходиться в зоні прямого попадання продуктів розпилення, то на ній спостерігається формування покриття з дворівневою структурою [11, 12].

На думку вчених, зазначені морфологічні особливості формування полімерних покриттів обумовлені перебігом процесів вторинної полімеризації не тільки на підкладці, а й у газовій фазі. Найбільші частинки неправильної форми, найімовірніше, формуються в результаті мікро-розбрикування розплаву полімеру при впливі на його поверхню потоку електронів [10-12].

За результатами проведених досліджень морфологічних особливостей зростання покриттів ПТФЕ з активного газового потоку, що генерується ВЧ-розпорошенням вихідного полімеру, можна зробити наступні висновки:

- значний вплив на кінетику зростання покриття, його структуру надають процеси його травлення активною високоенергетичною

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | ДРМТВАТАМ 23.18093.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 37 |

компонентою потоку. Так, при певних режимах процесу при мінімальній концентрації кисню в камері виявлена практично нульова швидкість росту покриття на пізніх стадіях;

- окислення полімеру ускладнює, мабуть, його вторинне розпилення, і швидкість зростання покриття зростає.

Електронно-мікроскопічні дослідження показали:

- сформована при таких режимах нанесення поверхня покриттів при певній товщині ($\sim 0,5 \dots 3$ мкм), що залежить від температури формування та складу молекулярного потоку, стає шорсткою. При відносно низьких температурах поверхні підкладки ($T < 430$ К) і її обробки потоком електронів шорсткість незначна і проявляється у вигляді системи рівномірно розподілених округлених мікровиступів, які можуть бути ідентифіковані як елементи надмолекулярної структури полімеру. За відсутності в молекулярному потоці заряджених частинок поверхня покриття більш розвинена, і швидкість зростання досягає максимального значення [10, 12];

- при підвищенні температури ($T > 430$ К) і товщинах більше 3 мкм на поверхні покриття, сформованого в умовах дії на нього плазми, виявлено появу стовпчастих утворень, орієнтованих перпендикулярно поверхні підкладки, висота яких порівнянна з товщиною покриття.

Методом ІЧ-спектроскопії встановлено, що орієнтовані утворення мають вищу, порівняно з основним покриттям, ступінь кристалічності. Можна припустити, що інтенсивне зростання кристалічних областей покриття обумовлено їх теплофізичними характеристиками: більш високою теплопровідністю, що може призвести до локального зменшення температури, а відповідно і підвищення адсорбційної активності. Результати оцінки розігріву поверхні під дією падаючого на неї теплового потоку, теплоти полімеризації, що виділилася, показали [10; 12], що при даних товщинах покриття та морфології її поверхні температура орієнтованих кристалічних виступів може бути при певних режимах процесу навіть вище

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | ДРМТВАТАМ 23.18093.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 38 |

температури аморфних областей. Отже, локальне зміна температури поверхні покриття неспроможна пояснити настільки значне експериментально спостерігається відмінність швидкостей зростання аморфних і кристалічних утворень.

Проведений огляд досліджень із застосування фторвмісних сполук у вигляді тонких покриттів різного складу, будови та технології отримання свідчить про особливу ефективність комбінованих покриттів, кожен із шарів яких надає доповнювальну дію на сукупну структуру. Також покриття можуть бути сформовані як із застосуванням спеціальних технологій, наприклад, вакуумних, розчинних, так і в процесі експлуатації трибосистеми внаслідок створення сприятливих умов для запобігання процесу видалення із зони фрикційного контакту продуктів трибохімічних перетворень. Цей підхід може бути реалізований шляхом застосування спеціальних підшарів на контактних поверхнях, наприклад, з TiN або композицій на його основі, а також при введенні до складу композиційних триботехнічних матеріалів на основі фторовмісних матриць компонентів, що активують процеси знакозмінного та латерального перенесення внаслідок особливої будови модифікаторів. Особливий інтерес становлять у цьому аспекті фторкомпозити на основі високомолекулярних матриць, переважно політетрафторетилену.

2.2 Фрикційні властивості покриттів.

Процес затуплення інструменту при обробці матеріалів представляє складний комплекс явищ фізико-механічного, теплового та хімічного характеру, які відбуваються при різанні у безпосередній близькості до леза. Зміцнювальні шари для ріжучого інструменту повинні мати високу твердість і в той же час не знижувати теплопровідність інструментального матеріалу. При різанні в результаті термічної деструкції утворюються агресивні

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | ДРМТВАТАМ 23.18093.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 39 |

речовини, отже зміцнені поверхні повинні мати підвищену корозійну стійкість. Зміцнення повинно проводитися таким чином, щоб після переточування інструменту зміцнені поверхні продовжували виконувати свої функції.

Правильно обране покриття значно подовжує життя інструменту, забезпечуючи додатковий захист інструментального матеріалу від тертя та високої температури.

Використовуються різні види покриттів [20]:

Алюмонітрид титану (TiAlN), служить чудовим утеплювачем в операціях обробки, що характеризуються високими температурами, у тому числі без застосування ОЗР. Це покриття характеризується такими показниками:

- опір високотемпературному зносу. Покриття TiAlN дозволяє інструменту зберігати опір зношування при високій температурі, оскільки має температуру плавлення приблизно на 3-5% більше, ніж нітрид титану (TiN);

- ковзний ефект. Зовнішній шар покриття TiAlN є оксидом алюмінію, який є одночасно твердим і ковзним. Добре захищаючи інструмент від зношування, оксид алюмінію ніби змащує гарячу стружку, щоб вона ковзала по поверхні фрези без теплопередачі та прилипання. Низький коефіцієнт тертя робить це покриття ефективним в обробці графіту, чавуну та інших абразивних матеріалів.

Нітрид титану карбіду (TiCN). Товсте багат шарове покриття, яке переважно застосовується для обробки сталі. Недолік цього покриття полягає в тому, що його не можна повторно наносити. Інструменти, покриті TiCN, зазвичай повторно покриваються TiN.

Покриття TiCN - дороге, застосовується там, де твердість заготівлі менше 42 HRC і швидкість різання не більше 240 м/хв. За цих умов різання рекомендується використовувати емульсію, що охолоджує.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | ДРМТВАТАМ 23.18093.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 40 |

Нітрид титану (TiN). Це покриття дуже дешеве і хоча не може працювати в умовах, в яких працюють два попередні покриття, воно є найбільш універсальним і рентабельним.

Накопичено експериментальний матеріал, який дозволяє зробити кілька узагальнень, що стосуються особливостей самого процесу різання інструментами з покриттям та їх зношування [20]:

- покриття TiN, TiC, Al₂O₃ на інструментах із швидкорізальних сталей та твердих сплавів знижують сили різання (до 20 %), коефіцієнт укорочення стружки та зменшують потужність тепловиділень.

- покриття TiN, TiC забезпечують багаторазове (від 2 до 5 разів) підвищення стійкості інструментів з швидкорізальних сталей та твердих сплавів при обробці конструкційних вуглецевих сталей нормальної та підвищеної твердості та малоефективні при різанні важкооброблюваних матеріалів. В останньому випадку працездатнішими виявилися покриття на основі карбідів і нітридів молібдену, гафнію, цирконію, а також багатокомпонентні та багат шарові покриття різних конструкцій;

- за умов різання як наростоутворення зменшуються розміри наросту;

- працездатність різальних інструментів визначається властивостями як покриття, а й інструментальної основи. Найкращі результати слід очікувати у тому випадку, коли під покриття розробляється спеціальна інструментальна основа з підвищеними характеристиками міцності та в'язкості;

- при різанні інструментом із швидкорізальних сталей з покриттям на обох поверхнях леза знижується інтенсивність зношування задньої поверхні та змінюються параметри лункоутворення. Переточування по передній поверхні часто призводить до зниження стійкості інструменту до рівня неукріпленого, а по задній - не впливає на стійкість або знижує її незначно. Виявлено також, що покриття в зоні лункоутворення, а часто на задній поверхні зникає в перші хвилини роботи.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | ДРМТВАТАМ 23.18093.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 41 |

На відміну від інструментів з швидкорізальних сталей, твердосплавні інструменти з покриттями мають високу працездатність до прориву покриття на задній або передній поверхні, причому покриття на них залишається цілим значно довше. Крім того, утворення лунки на передній поверхні твердосплавного інструменту стримується істотно і відбувається спочатку без прориву покриття шляхом пластичного вдавлювання матеріалу основи. Після прориву лункоутворення пришвидшується. Зазначається разом з тим, що при частковому руйнуванні покриття твердосплавний інструмент продовжує зберігати все ж таки більш високу працездатність порівняно з інструментом без покриття.

Застосування TiN покриття почалося із середини минулого століття. З метою підвищення зносостійкості та регулювання фрикційних властивостей покриттів проведено низку наукових праць.

Так, наприклад, у роботі [21] вивчали поведінку зразків із сталі з TiN-покриттям на повітрі при ковзанні по них сталевих та сапфірових кульок з малою швидкістю ($<0,1 \text{ мс}^{-1}$). У разі сапфірової кульки коефіцієнт тертя μ в початковий момент дорівнював 0,05. Потім він безперервно зростав до 01-015. У разі сталевий кульки початкова величина μ склала 0,17 і потім досягала 0,6 пропорційно обсягу продуктів зносу, акумульованих у доріжках зносу TiN-покритті. Після полірування TiN-покриття до товщини 4 мкм масоперенос знижувався і знаходилося в межах 0,15-0,2. Методами металографії та електронної мікроскопії встановлено, що основними продуктами зносу були TiO_2 (рутил) та ромбоєдричний потрійний оксид системи $\text{FeTiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$. Обидві фази представлені скупченням дуже дрібних частинок ($\sim 10 \text{ мкм}$), які трансформувалися в тонкі однорідні лусочки при малих значеннях μ і сфероїдальні скупчення при високих значеннях μ .

Також у роботі [21] були наведені результати вивчення впливу на ці фактори тонкого-зносостійкого покриття TiN, нанесеного методом КІБ на підкладку із стандартно термообробленої швидкорізальної сталі Р6М5 (HRC

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | ДРМТВАТАМ 23.18093.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 42 |

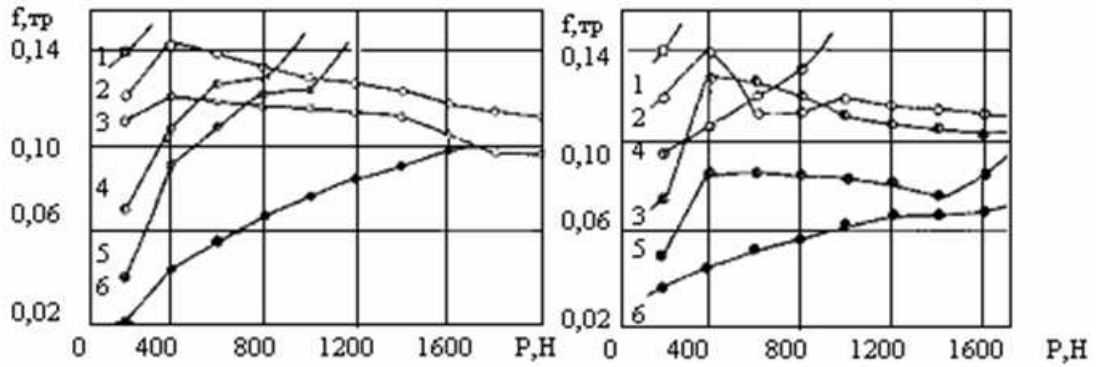
63...65). Дослідження проведено при обробці нормалізованої сталі 45, яку часто використовують для порівняльних випробувань інструментів. Точіння є певною мірою модельним видом обробки металів різанням, і закономірності, що виявляються при точінні, тією чи іншою мірою характерні і для інших операцій різання.

Для порівняння наведені аналогічні характеристики іншої пари тертя: швидкорізальна сталь-сталь 45. Випробування на тертя та знос проводилися за схемою циліндр-площина на машині тертя СМЦ-2, циліндр діаметром $\varnothing 50$ мм виконаний зі сталі 45, термообробленої на феритно-перлітну структуру (HB17). Покриття наносилося на нерухоме контртіло - куб з ребром, рівним 10 мм, який виготовлений зі швидкорізальної сталі Р6М5, шорсткість підкладки $Ra = 0,16$ мкм.

Коефіцієнт тертя визначали в залежності від нормального навантаження для трьох випадків: тертя без змащування, тертя в олії МІХП-3 і ОЗР (3 % водний розчин емульсолу ЕТ-2 з додаванням 0,2 % Na_2O_2 і 0,5 % Na_2CO_3). Змащування здійснювалося зануренням частини контртіла в масло або ОЗР. Випробування на зносостійкість проводилися в середовищі ОЗР при постійному навантаженні (500 Н) протягом однієї години, після чого визначали ширину виробленої лунки, розраховували об'єм віддаленого матеріалу та питомий знос, тобто. обсяг матеріалу, що видаляється на одиницю шляху різання.

Залежність коефіцієнта тертя $f_{тр}$ від навантаження (рис. 2.1) має складний характер, хоча в цілому переважає зростання значення $f_{тр}$ у міру збільшення навантаження для пари швидкорізальна сталь - сталь 45 і деяке зниження - для другої пари при терті в середовищі олії та ОЗР. Середній рівень $f_{тр}$ вище при терті покриття. Для обох пар тертя мінімальні значення $f_{тр}$ спостерігаються за умов змащування олією, максимальні — при терті без мастила. Зазначені закономірності якісно характерні для двох швидкостей ковзання: 0,8 та 1,3 м/с.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | ДРМТВАТАМ 23.18093.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 43 |



а)

б)

Рисунок 2.1 – Залежність коефіцієнта тертя від навантаження при терті сталі 45 сталі Р6М5 і покриттю TiN (а - 0,8 м/с; б-1,3 м/с):

1- TiN, без мастила; 2 -TiN, ОЗР; 3 - TiN, олія; 4 - Р5М5, без мастила; 5 - Р6М5, ОЗР; 6 - Р6М5, масло.

На зразках з покриттями задиротворення характеризується, перш за все, сколом самого покриття, а підкладка незначно руйнується. При терті сталі Р6М5 задиротворення супроводжується вириванням значних обсягів матеріалу. У разі тертя без мастила критичне навантаження задиротворення $R_{кр}$ пари покриття - сталь 45 набагато менше, ніж у пари сталь Р6М5 - сталь 45 (табл. 2.2). В умовах змащування маслом та ОЗР стійкість проти задиротворення значно зростає, причому пари мають однаковий рівень $R_{кр}$, якщо використовується олія, або вона вища для пари покриття — сталь 45, якщо застосовується ОЗР - це свідчить про високу ефективність мастила, особливо ОЗР, при терті з покриття, а також про недоцільність використання покриття в умовах тертя без змащування. Висока стійкість покриттів проти задиротворення, очевидно, пояснюється їхньою хорошою адсорбуючою здатністю по відношенню до поверхнево-активних речовин, що присутні в мастилі, і особливо в ОЗР, що пов'язано з розвиненим мікрорельєфом поверхні покриття або пористістю.

| | | | | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | Арк. |
| | | | | | | | | | 44 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | ДРМТВАТАМ 23.18093.000 ПЗ | | | | |

Таблиця 2.2 – Навантаження задироутворення при терті сталі 45 сталі Р6М5 і покриття TiN зі змащенням і без.

| мащення | зразок | Критичне навантаження задироутворення, Н, при швидкостях ковзання, м/с | |
|-------------|----------|--|-------|
| | | 0,8 | 1,3 |
| Без мастила | Р6М5+TiN | 200 | 200 |
| | Р6М5 | 800 | 800 |
| ОЗР | Р6М5+TiN | >2000 | >2000 |
| | Р6М5 | 1200 | 1600 |
| Масло | Р6М5+TiN | >2000 | 1800 |
| | Р6М5 | >2000 | 1800 |

Згідно з результатами випробувань на зношування (табл. 2.2) покриття в порівнянні зі сталлю Р6М5 має більш високу зносостійкість, причому зі збільшенням швидкості ковзання питомий об'ємний знос покриття не змінюється, а у сталі Р6М5 збільшується більш ніж удвічі.

Таблиця 2.2 – Питоме об'ємне знос покриття TiN і сталі Р6М5 при терті сталі 45 (нормальне навантаження 500Н, час випробувань 1 година)

| Зразок | Швидкість ковзання, м/с | Питомий об'ємний знос мм ³ /м |
|----------|-------------------------|--|
| Р6М5+TiN | 0,8 | $1,0 \cdot 10^{-6}$ |
| Р6М5 | 0,8 | $2,5 \cdot 10^{-5}$ |
| Р6М5+TiN | 1,3 | $1,0 \cdot 10^{-6}$ |
| Р6М5 | 1,3 | $5,2 \cdot 10^{-5}$ |

Інтенсивність зношування та рівень f_{tr} визначаються як комплексом властивостей матеріалів, так і умовами фрикційного контакту. Висока мікротвердість покриття може однозначно корелювати з його високою зносостійкістю і в той же час визначати відносно більш високий коефіцієнт тертя, особливо на початку навантаження, коли в контакт вступають ділянки поверхні, що виступають, виконують роль закріпленого абразиву. При цьому можливі також високі значення адгезійної складової коефіцієнта тертя, чому сприяє інтенсивна пластична деформація поверхні контртіла з руйнуванням окисних плівок та оголення ювенільних поверхонь. У міру стирання виступаючих нерівностей та формування захисних плівок на поверхні покриття різницю між значеннями коефіцієнтів тертя покриття та швидкорізальної сталі зменшується, що підтверджується ходом кривих. Більше того, зі збільшенням навантаження настає такий момент, коли коефіцієнт тертя пари з покриттям стає меншим у середовищі ОЗР це відбувається при менших значеннях нормального навантаження, ніж у маслі.

В експериментах температура фрикційного контакту не фіксувалася. Разом з тим, очевидно, що з підвищенням швидкості обертання циліндричного контртіла температура тертя зростає.

Ймовірно, саме з цим пов'язане збільшення питомого об'ємного зносу Р6М5 при зміні швидкості ковзання від 0,8 до 1,3 м/с. По відношенню до температурного фактора покриття, очевидно, виявляється стійкішим, оскільки його питомий об'ємний знос від швидкості ковзання не залежить.

Судячи з вигляду зношеної поверхні (оптична мікроскопія), покриття після одногодинних випробувань наскрізь не зношується. Ці спостереження збігаються з вимірами максимальної глибини канавки зношування. Поверхня покриття в зоні фрикційного контакту виглядає в порівнянні з рештою площею темнішою, що пов'язано, по-перше, з розмазуванням крапель по поверхні тертя і, по-друге, з окисненням покриття під впливом підвищених температур у середовищі ОЗР, на окремих ділянках фрикційного майданчика

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | ДРМТВАТАМ 23.18093.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 46 |

контакту, як правило, біля периферії спостерігаються сколи покриття, що визначається найбільш сприятливими умовами порушення адгезійного зв'язку покриття з підкладкою. На поверхні тертя сталевих зразків Р6М5 без покриття при швидкості ковзання 0,8 м/с утворюються тріщини в цих умовах при терті з покриття тріщиноутворення не спостерігається.

При навантаженні 500 Н і геометрії контакту, що реалізується, розвиваються контактні напруги, що досягають декількох десятків мегапаскалей. Аналогічна напруга виникає при різанні на контактних поверхнях ріжучого інструменту. Висока зносостійкість покриття та його слабка чутливість до температури, очевидно, важливі для вирішення задачі підвищення стійкості ріжучих інструментів, проте потрібно враховувати, що покриття стійке до задироутворення тільки у разі використання мастила.

При терті контрольних зразків з інструментальних матеріалів за контртілами з важкообробних матеріалів найбільше зниження сили тертя FK забезпечують двофазні тверді сплави ВК, причому відзначається тенденція збільшення FK зі зростанням зернистості цих сплавів і вмісту кобальту [21]. Разюче зниження FK забезпечували покриття на основі нітридів тугоплавких металів V і VI груп періодичної системи елементів порівняно з нітридами та карбідами металів цієї групи. При терті титанових сплавів BT16 і BT20 особливо помітна мала ефективність покриттів TiC і TiN, проте відзначається тенденція зниження FK при терті титанових сплавів для покриттів з нітридів металів IV групи наступної послідовності: TiN, ZrN і HfN.

Для сплавів, що важко обробляються, відзначено значно більше зниження сили тертя при нанесенні покриттів на основі нітридів металів V і VI груп, ефективність яких зростає в наступній послідовності; NbN, CrN та MoN.

На основі проведених досліджень автор [21] робить наступний висновок, що для конструкційних сталей максимальне зниження схильності до захоплювання швидкорізальних сталей та твердих сплавів забезпечують

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | ДРМТВАТАМ 23.18093.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 47 |

композиційні покриття $TiC-Al_2O_3$ ГТ, $TiC-TiCN-TiN(Zr/Hf-Cr)N$, $(Nb-Zr)N$, нанесених іонно-плазмовим методом. Для жароміцних сплавів на залізо хромонікелевій основі найкращі результати забезпечують композиційні покриття $(Nb-Zr)N$, $(Ti/Nb-Cr)N$ для титанових сплавів - покриття $(Nb-Zr)N$ та $(Zr/Hf-Cr)N$, також нанесених іонно - плазмовим методом.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | ДРМТВАТАМ 23.18093.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 48 |

РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ПОКРИТТІВ.

3.1 Вибір матеріалу зразка.

У цьому розділі викладено питання методики проведення експериментів. Для проведення досліджень були обрані зразки з T14K8 та P9K5 розміром 10x10x5 для різця. Вибір цих матеріалів був обумовлений широким їх застосуванням як ріжучий інструмент для верстатів з ЧПУ, а також досить високою ціною на дані матеріали на світовому ринку, отже, зміна експлуатаційних властивостей даного матеріалу за рахунок нанесення покриттів з різними властивостями є актуальним та перспективним завданням.

Точний хімічний склад визначалися з використанням електронного скануючого мікроскопа JSM-7500F (рис. 3.1) фірми «JEOL» високої роздільної здатності [22]. Основні характеристики даного мікроскопа наведено у таблиці 3.1.

Растровий електронний мікроскоп JSM-7500F це інноваційний оптичний прилад із «холодним» (автоемісійним) катодом. Він поєднує високий ресурс катода та простоту керування, а також якісні аналітичні можливості. Має низьке енергоспоживання.

Взаємодія холодного катода з об'єктивною лінзою (semi-in-lens) відкритого типу дозволяють отримувати якісні зображення із високою роздільною здатністю та суттєвим контрастом при низьких прискорювальних напругах і малих струмах пучка. Дозволяє досліджувати зразки, що чутливі до пучка – полімерами, біологічні зразки, напівпровідники тощо.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | ДРМТВАТАМ 23.18093.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 49 |

Таблиця 3.1 – Характеристики мікроскопа JSM-7500F

| № | Прискорювальна напруга | Від 0,5 до 30 кВ |
|---|--|---|
| 1 | Роздільна здатність (зображення у вторинних електронах) | 15 ангстр. (1.5нм) при 15 кеВ 30 ангстр. (3нм) в аналітичному режимі (5нА, 15кеВ) 50 ангстр. (5нм) при 1 кеВ |
| 2 | Збільшення | від 10 до 500 000 |
| 3 | Система управління приладом | Персональний комп'ютер з ОС Windows 2000, зручний і інтуїтивно зрозумілий графічний інтерфейс |
| 4 | Можливості встановлення додаткових детекторів та систем мікроаналізу | EDS, WDS, CLD, EBSP, EBIC та ін. |
| 5 | Переміщення моторизованого столика для зразків з комп'ютерним керуванням | По осях X, Y, Z, (стандарт), обертання, нахил (за додатковим замовленням) |
| 6 | Розмір зразка | До 150 мм у діаметрі та до 10 мм у висоту |
| 7 | Автоматичні функції | Автофокусування, авто контраст - яскравість, автостигматор |

В базовій комплектації мікроскоп оснащений автоматичною шлюзовою камерою. Камера значно зменшує витрати часу на заміну зразка, зменшує швидкість забруднення зразків, запобігає можливому ризику пошкодження аналітичних приставок в наслідок раптових перепадів тиску, що збільшує ресурс діафрагм і катода у декілька разів. При використанні шлюзу допускається дослідження великогабаритних зразків: до 200 мм у діаметрі та до 40 мм висоти.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | ДРМТВАТАМ 23.18093.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 50 |



Рисунок 3.1 – Скануючий мікроскоп JSM-7500F.

Розміри камери зразків дозволяють одночасно встановлювати різні аналітичні приставки, такі як:

- детектор дифракції відбитих електронів;
- енергодисперсійний спектрометр;
- романівський спектрометр;
- детектор катодолюмінісценції, тощо.

Вбудована антивібраційна система забезпечує мікроскопу стійкість до перешкод - тремтіння підлоги або акустичним шумам. Через дії системи оператор отримує якісні зображення навіть за несприятливих умов.

Зрозумілий та зручний інтерфейс спрощує роботу користувача. Передбачено також і щадний режим (ЕКЗ), що може включати РЕМ у запланований час (наприклад, за годину до початку досліджень), а також вимикання або переходу у сплячий режим після завершення циклу досліджень. Все це дозволяє заощадити від 25 до 55 % електроенергії та, особливо, робочий час обслуговуючого персоналу.

Мікроскоп JSM-7500F рекомендований для вирішення завдань у галузі матеріалознавства, нанотехнологій та біології.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | ДРМТВАТАМ 23.18093.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 51 |

Мікроскоп, оснащений супергібридною об'єктивною лінзою і катодом «Шоттки». Це поєднання є оптимальним рішенням для досліджень нанорозмірних зразків та надає оператору наступні дані:

- високі струмові характеристики електронного пучка (до 200 нА).
- висока якість
- унікальну конструкцію електронно-оптичної колони.
- можливості професійного застосування прогресивних методів дослідження:

- неперевершену стабільність пучка у часі.
- енергодисперсійного аналізу;
- хвилодисперсійного аналізу;
- катодолюмінісценції.
- дифракції обернено розсіяних електронів;

Прогресивна In-lens схема розміщення катода, використана в електронно-оптичній колоні мікроскопа дозволяє ефективно відбирати електрони, що емітуються з катода. При цьому, високий струм пучка підтримується, а лінзи, з оптимальним кутом апертури для формування тонкого зонда, ефективні навіть при значних струмах.

У стандартній конфігурації мікроскоп оснащений:

- системою Gentle Beam (GB), яка значно покращує роздільну здатність, у тому числі при низьких напругах, що прискорюють;
- детектором зворотно відбитих електронів;
- високоефективним детектором вторинних електронів.

Нова супергібридна об'єктивна лінза не має магнітного впливу на зразок, що дозволяє проводити дослідження магнітних матеріалів таких як NdFeB за допомогою аналітичних приставок.

Змінюючи значення напруги на енергетичному фільтрі для UED, детектора зворотно-розсіяних електронів і вторинних електронів режим роботи може бути змінено, що дозволяє обрати ту чи іншу енергію

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | ДРМТВАТАМ 23.18093.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 52 |

електронів для спостереження зображень з певним контрастом. USD добре фіксує низькоенергетичні електрони, що відхилені сітковим фільтром. Детектор BED дозволяє спостерігати ефект каналування. Він фіксує відбиті електрони, що вилітають із зразка під низькими або високими кутами. Детектор LED забезпечує отримання 3D-зображення, у тому числі інформацію про шорсткість поверхні.

Мікроскоп знімає показання з 4 різних точок, середнє арифметичне і буде показником марки матеріалу.

Перший зразок був взятий T14K8, що відноситься до твердо сплавів. Тверді сплави є тугоплавкими, зносостійкими металевими матеріалами, дуже великою твердістю; ці властивості зберігаються на досить високому рівні при нагріванні сплавів до 900-1000 °С, у тому числі в процесі експлуатації інструменту із застосуванням твердих сплавів у різальній частині. Тверді сплави ділять на металокерамічні та литі [11]. Такий поділ обумовлюється їх застосуванням, складами, формами і структурою, отже, різними фізико-хімічними властивостями, і навіть різною технологією виробництва. Тверді металокерамічні сплави виготовляють методом порошкової металургії, T14K8 відноситься саме до цієї групи.

Як другий зразок була швидкорізальна сталь - P9K5. Теплостійкі сталі високої твердості, звані швидкорізальними, найбільш характерні сталі, що використовуються для різальних інструментів [11]. Вони поєднують теплостійкість (600-700 °С) з високою твердістю (HRC 63-70) і підвищеним опором пластичної деформації. В результаті застосування швидкорізальних сталей стало можливим збільшити швидкість різання в 2-4 рази (а більш нових сталей з інтерметалідним зміцненням навіть у 5-6 разів) і підвищити стійкість інструментів у 10-40 і більше разів у порівнянні з одержуваними для інструментів з нетеплостійких сталей. Ці переваги швидкорізальних сталей виявляються при різанні з підвищеною швидкістю, в умовах нагрівання ріжучої кромки, або при меншій швидкості, але з високим тиском.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | ДРМТВАТАМ 23.18093.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 53 |

Для розуміння особливостей властивостей і області використання швидкорізальних сталей важливо, що зниження їх твердості на HRC 2-4 порівняно з максимальною може супроводжуватися погіршенням в'язкості, міцності і зносостійкості. Тому швидкорізальні сталі необхідно використовувати у стані високої твердості та при роботі без великих динамічних навантажень.

3.2 Підготовка мікро шліфів.

Найважливішим елементом технології нанесення будь-яких покриттів є підготовка робочих поверхонь різального інструменту.

Якість підготовки багато в чому визначає якість покриття, міцність його зчеплення з інструментальною матрицею. Недостатня ретельна підготовка різального інструменту перед нанесенням покриття може призвести до шлюбу виробу. Найбільш часто зустрічається брак виробу внаслідок поганої підготовки інструменту, що є наслідком відшаровування покриттів і, як наслідок, низька ефективність.

Технологія підготовки інструменту перед нанесенням покриття включає низку послідовних операцій. У будь-якому випадку велику увагу слід приділяти очищенню поверхні інструменту для того, щоб його робочі частини були хімічно та механічно чистими. При цьому виключається наявність окалини після термічної обробки, утворення корозійних та оксидних плівок сторонніх включень у вигляді олії та інших забруднень, а також дефектів поверхні інструменту у вигляді раковин, тріщин, задир тощо.

Приготування мікрошліфів з покриттям різного складу полягає у вирізуванні зразка, шліфуванні та поліруванні до дзеркального блиску [22].

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | ДРМТВАТАМ 23.18093.000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 54 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

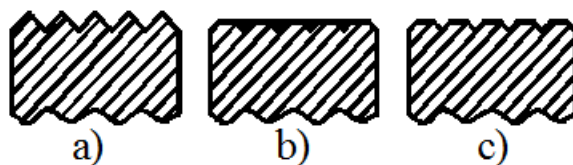


Рисунок 3.2 – Поверхня мікрошліфа в процесі його приготування:
 а) після грубого шліфування; б) після різкого переходу на тонке шліфування;
 с) після травлення.

Вирізаний зразок заточували на абразивному колі (зернистістю 46 і 60) з періодичним охолодженням, що не допускає перегріву зразка. Заточений зразок шліфувався шліфувальним папером (рис. 3.2) з поступовим переходом від паперу марки № 12 – 3 із зернистістю від 125 до 25 мкм до паперу марки М-40 – М-5 мікронною зернистістю від 28 до 3,8 мкм до видалення рисок. При переході від одного номера зернистості до іншого здійснювалося очищення зразків від абразиву та змінювався напрямок шліфування на 90° . При підготовці мікрошліфів не допускався різкий перехід з грубої шліфовки на дрібну, тому що в результаті часто створюється помилкове враження, що шліф добре приготовлений. Насправді відбувається лише згладжування вершин гребенів, що виникають після грубого шліфування та заповнення западин зішліфованим металом та абразивом, що виявляється після травлення зразка, на якому чітко проступають подряпини.

Шліфування зразків проводилося вручну, коли шліфувальний папір кладеться на рівні плоскі плити (скло, мармур), можливий також варіант шліфування на спеціальних верстатах із закріпленням шліфувального паперу на дисках або стрічках, що обертаються, але в даному випадку цей метод не використовувався. Після остаточного шліфування зразок ретельно очищався від абразиву та полірувався до повного зникнення рисок. Для полірування зразків, крім шліфувального паперу, застосовувалися спеціальні пасти. Паста ГОІ, до складу якої входить окис хрому, стеарин, олеїнова кислота, сода, гас,

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | ДРМТВАТАМ 23.18093.000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 55 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

наносилася на м'яке сукно. Полірування проводилося вручну з періодичним контролем поверхні мікрошліфу візуальним методом.

Крім механічного полірування, існують ряд прогресивних методів, таких як: хіміко-механічне полірування, при якому до складу суміші, що полірує, вводиться хімічно активна речовина, що впливає на поверхню зразка і прискорює процес полірування; метод електрохімічного полірування, при якому зразок як анод поміщають в електролітичну ванну. Склад електроліту (фосфорна, сірчана, хлорна кислота), матеріал пластини катода (свинець, мідь, алюміній, цинк) та щільність струму на аноді (зразку) залежать від матеріалу, що полірується. При пропусканні струму всі нерівності зразка, що залишилися після шліфування, розчиняються і зразок набуває рівної дзеркальної поверхні.

3.3 Технологічний процес нанесення покриттів.

Якість та надійність іонно-плазмових нітридних покриттів визначається сукупністю технологічних параметрів напилення (тиск газу, опорна напруга, струм дуги, температура підкладки). Нанесення покриттів на зразки проводилося на установці типу ННВ-6,6-ІІ, яка призначена для нанесення захисних та зміцнювальних покриттів на вироби машинобудування, різальний інструмент, штампове оснащення. Ці покриття підвищують зносостійкість і збільшують ресурс роботи найважливіших елементів різного обладнання за рахунок підвищення ерозійної, корозійної та абразивної стійкості конструкційних матеріалів, що використовуються.

Установка іонно-плазмова вакуумна камерна ННВ-6.6-ІІ забезпечує нанесення зміцнювальних багат шарових та одношарових покриттів на різний інструмент широкої номенклатури розмірами: діаметр: до 200 мм, довжина: до 250 мм, за рахунок конденсації речовини з бомбардуванням іонів.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | ДРМТВАТАМ 23.18093.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 56 |

Сфера застосування різноманітна: для напилення коронок зубів, декоративне напилення на виробах з металу та скла, пластмаси та порцеляни, тощо.

Структура умовного позначення ННВ-6.6-ІІ:

Н – спосіб нагрівання – іонний;

Н – головна конструктивна ознака – камерна;

В – атмосферне середовище у робочому просторі – вакуум;

6 – діаметр камери робочої, дм;

6 – висота камери робочої, дм;

ІІ – порядковий номер виконання.

Конструкція та принцип дії. Установка (рис. 3.3 і 3.4) складається з таких основних вузлів: електрод струмопідвідний; корпус; (електродуговий випарник); дверцята; система водоохолодження; механізм обертання; заснування; вакуумна система; електрична частина.

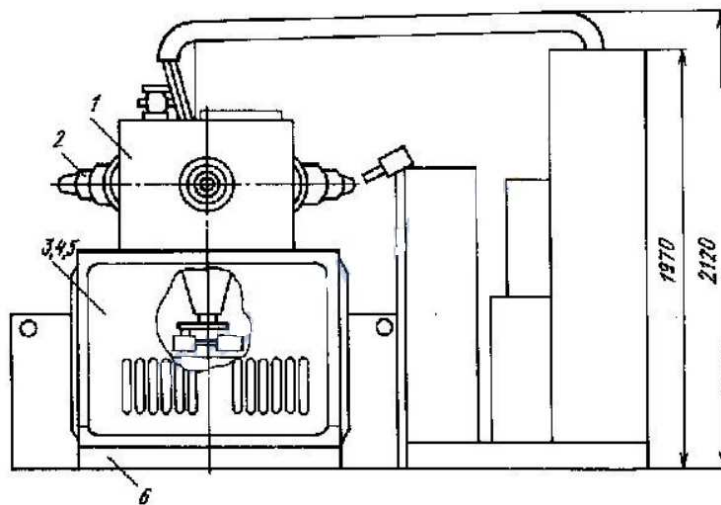


Рисунок 3.3 – Загальний вигляд установки ННВ-6.6-ІІ:

1 – дверцята; 2 – електрод струмопідвідний (електродуговий випарник); 3 – система водоохолодження; 4 – вакуумна система; 5 – механізм обертання; 6 – основа.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | ДРМТВАТАМ 23.18093.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 57 |

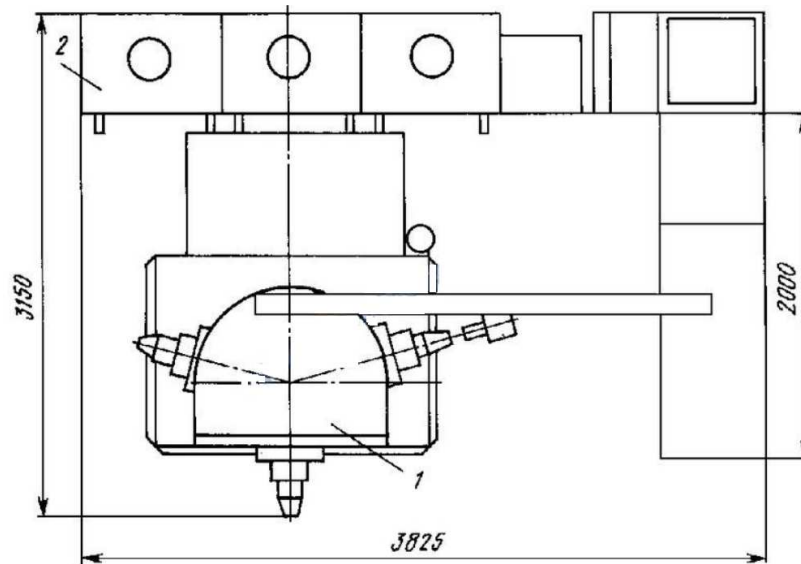


Рисунок 3.4 – Вид зверху установки ННВ-6.6-11:

1 – корпус; 2 – електрична частина.

Корпус виконано у вигляді вертикальної циліндричної ємності з боковим отвором, що закривається дверцятами. Він має подвійні стінки, що утворюють порожнину для водоохолодження (або, при необхідності, підігріву при відкачуванні камери). Два струмопідвідних електроди встановлені на бічних стінках корпусу. Корпус разом із дверцятами працює як вакуумна камера.

Подвійні стінки дверцят утворюють порожнину для водоохолодження. Третій струмопідвідний електрод встановлений на дверцятах. При необхідності, він може бути розташований на верхній площині корпусу.

Струмопідвідний електрод, що виступає електродуговим випарником, складається захисного кожуха та з тримача і корпусу, що електрично ізольовані один від одного.

Система водоохолодження складається з трубопроводів та панелі водорозподільної. У панелі передбачене віконце для візуального контролю руху води, а також датчики сповіщення її рівня. Встановлені на колекторі вентилі регулюють витрати води.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | ДРМТВАТАМ 23.18093.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 58 |

Вакуумна система забезпечує створення в робочій камері необхідного робочого тиску. За допомогою автоматичного регулятора надходження робочого газу виконується регулювання залишкового тиску.

Механізм обертання оснащений електромеханічним приводом, що складається з редуктора та електродвигуна постійного струму, з'єднаних клинопасовою передачею. Електродвигун має можливість змінювати напрямок обертання і кількість обертів.

Основа (остов) призначена для встановлення камери, системи водоохолодження, вакуумної системи, та системи підігріву. У тумбі остова розташовані блоки підпалу дуги та механізм обертання. Електродвигун змонтований на плиті, що кріпиться до тумби остову.

Панель водоохолодження і вакуумна система розміщені на майданчику основи. На майданчику, під знімним листом, розташовані дроти ланцюгів керування і силові ланцюги.

Електрична частина забезпечує електропостачання установки та керування технологічним процесом. Електропостачання живиться від трифазної мережі з напругою 380 В, ланцюги керування живляться напругою 220 В з частотою 50 Гц.

Високовольтний трансформатор, тиристорний перетворювач напруги, і випрямляч складають високовольтне джерело живлення, що дозволяє регулювання напруги в діапазоні від 100 до 1500 В.

Джерело опорної напруги, що містить трансформатор, тиристорний перетворювач (загальний з високовольтним джерелом) і випрямляч, забезпечує регулювання напруги в діапазоні від 20 до 280 В.

Система напуску робочого газу (азоту) використовується для отримання покриттів нітридів металу. Система складається з електронного блоку управління, клапана напускового регульованого та клапана з електромагнітним приводом.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | ДРМТВАТАМ 23.18093.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 59 |

Для покриття інструменту із швидкорізальної інструментальної сталі, твёрдосплавного сплаву та паяного твёрдосплавного інструменту використовують покриття TiN, TiCN, TiAlN, MoS₂, CrN, B₄C, DLC з товщиною до 5 мікрон. Інструмент із такими покриттями використовується для обробки сталей, чавуну, силуміну, міді, бронзи, алюмінію.

Процес нанесення покриття можна розглядати як складається з двох етапів: підготовка обладнання та оснащення до роботи та безпосередньо формування покриття.

1. Підготовка обладнання та оснащення до роботи.

Підготовку обладнання та оснастки проведено в даній роботі можна описати послідовністю наступних дій:

Перед відкриттям вакуумної камери прогріти до температури 60-80 °С. Прогрівання вакуумної камери призначене для запобігання конденсації та видалення парів води з поверхні стінок камери, а також для знегажування в процесі відкачування.

Увімкнути форвакуумні насоси, натиснувши на кнопки «Форвакуумний насос I» та «Форвакуумний насос II».

Таблиця 3.2 – Основні технічні дані установки ННВ-6,6-11

| | | |
|---|---|--------------------|
| 1 | Розміри робочої камери, мм | Знач. |
| | діаметр | 600 ⁺³⁰ |
| | висота | 600 ₋₂₀ |
| 2 | Кількість електродів струмопідвідних з магнітним фокусуванням плазмового потоку та електронним безконтактним підпалом, шт | 3 |
| 3 | Максимальне допустиме навантаження на вісь сателіту механізму обертання, кг | 10 |
| 4 | Точність регулювання автоматичного натікача, % від діапазону шкали | ±2,5 |

| | | |
|----|---|--|
| 5 | Тривалість циклу зміцнення інструменту, год | До 2,5 |
| 6 | Швидкість осадження покриття (нітриду титану), мкм/год | від 13 до 40 |
| 7 | Номінальний струм високовольтного джерела живлення підкладки, А | 20 |
| 8 | Діапазон плавного регулювання величини напруги високовольтного джерела живлення підкладки | від 100 до 1500 |
| 9 | Діапазон плавного регулювання величини напруги низьковольтного джерела живлення підкладки | від 20 до 280 |
| 10 | Потужність, що споживається, кВт | 50+5 |
| 11 | Залишковий тиск у камері, Па | $6,65 \cdot 10^{-3}$ – $6,65 \cdot 10^{-1}$ |
| 12 | Габаритні розміри установки, мм | |
| | довжина | 3600 |
| | ширина | 3900 |
| | висота | 2070 |
| 13 | Маса установки, т | 3,1 |

Відкрити вакуумний клапан відкачування дифузійного насоса, натиснувши кнопку «Високовакуумне відкачування». Увімкніть електронагрівач дифузійного насосу, натиснувши кнопку «Дифузійний насос».

Пристрій для встановлення інструменту протерти бензином, а потім спиртом.

Відкрити вентиль - натікач вакуумної камери і напустити повітря. Відкрити дверцята вакуумної камери.

Встановити пристрій із зразками в камеру і зміцнити його. Завантаження зразків у вакуумну камеру здійснювалося в рукавичках з бавовняної безворсової тканини.

| | | | | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | Арк. |
| | | | | | | | | | 61 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | ДРМТВАТАМ 23.18093.000 ПЗ | | | | |

Закрити дверцята вакуумної камери, закрити вакуумний клапан "Високовакуумне відкачування" і відкрити вакуумний клапан форвакуумного відкачування, натиснувши на кнопку «Форвакуумне відкачування». При досягненні тиску камері $5 \cdot 10^{-1}$ мм.рт.ст. за показанням вакуумметра ВІТ-3 відкривається вакуумний вентиль «Паралельна робота».

Після досягнення у вакуумній камері тиску $5 \cdot 10^{-2} - 1 \cdot 10^{-2}$ мм.рт.ст. та прогрівання дифузійного насоса, закривається вакуумний клапан форвакуумного відкачування, відкривається клапан «Високий вакуум» та відкривається електромеханічний затвор дифузійного насоса.

При досягненні тиску у вакуумній камері $1 \cdot 10^{-4}$ мм.рт.ст. відключається нагрівання води та включається подача холодної води.

Відкрити балон з газом, тумблер «Газ» поставити у положення «Автоматичне», відкрити клапан напуску газу в камеру та потенціометром відрегулювати тиск $3 \cdot 10^{-3}$ мм.рт.ст. Потім клапан напуску газу закрити камеру відкачати до необхідного тиску.

2. Процес формування покриття.

Процес формування покриттів на зразки можна описати послідовністю дій:

Іонне очищення та нагрівання інструменту.

Подати напругу на тиристорний регулятор (РНТТ), увімкнувши тумблер «Джерело живлення» і натиснувши кнопку «Струм», перевіривши, щоб ручка потенціометра «Регулювання напруги» була виведена в крайнє ліве положення, так як включення та відключення джерела високої та опорної напруги при сигналі управління на РНТТ, не рівному нулю, може спричинити вихід джерела живлення високої напруги з ладу.

Ручкою потенціометра "Регулювання напруги" встановити на підкладці напругу 1,5 кВ.

На блоках БА-12 увімкнути тумблери «Мережа». Потенціометрами «Фокусуєча котушка» було встановлено струм у фокусуєчих котушках 0,2

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | ДРМТВАТАМ 23.18093.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 62 |

А, потенціометрами «Стабілізуєча котушка» встановлено початковий струм у стабілізуєчих котушках 0,2 А, а після загоряння дуги – 0,8 А.

Включити тумблер «Зварювальні випрямлячі» та на блоках БА-12 включити один із випарників. Величина струму дуги при випаровуванні титану становила 90 А. Тривалість горіння дуги контролювалося за величиною струму в ланцюзі катод – виріб за амперметром на стійці управління та за ступенем вакууму в робочій камері установки. Імпульсний прогрів проводився до припинення виникнення мікродуг на виробах, що зміцнюються, шляхом включення кожного випарника.

3. Формування шару покриття.

Для переходу до процесу осадження потенціометром «Регулювання напруги» знизити напругу до мінімуму, відключити високу напругу та кнопкою «Опорна напруга» подати на підкладку опорну напругу. Опорна напруга встановлювалася у розмірі 250 В, не виключаючи випарники. Подати газ у вакуумну камеру, перевівши тумблер «Газ» в положення «Автомат». Потенціометром "Автомат" встановлювався необхідний тиск у вакуумній камері.

Потенціометрами «Стабілізуєча котушка» було встановлено струм у стабілізуєчих котушках електродугових випарників 0,7-0,8 А.

Струм дугового випарника був встановлений у розмірі 90 А.

Охолодження виробів та вивантаження.

Після закінчення процесу формування покриттів необхідно провести наступні операції: вимкнути випарники, натисканням на кнопки «Вимк» на блоках БА-12. Потенціометр «Регулювання напруги» вивести в крайнє ліве положення, відключити джерело живлення та РНТТ, натиснувши на кнопки «Опорна напруга» і «Струм». Відключити тумблери «Джерело живлення», «Зварювальний випрямляч», вимикачі «Мережа» на блоках БА-12. Припинити подачу газу в вакуумну камеру, перевівши тумблер «Газ» в положення «Ручне» і натиснувши на стопорну кнопку «Газ».

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | ДРМТВАТАМ 23.18093.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 63 |

Вимкнути механізм обертання, натиснувши кнопку «Стоп».

Охолодити вироби у вакуумній камері до температури нижче 200°C.

Напустити в прогріту вакуумну камеру повітря, натиснувши кнопку «Повітря». Здійснити вивантаження виробів.

Після закінчення розвантаження закрити вакуумний вентиль напуску повітря.

Вимкнення установки.

Вимкнення установки.

Параметри процесу осадження покриттів при проведенні експериментальних досліджень зведені в таблицю 3.3.

Таблиця 3.3 – Параметри досліджуваного технологічного процесу

| № | Покриття | Р, мм | Утл.р., | тл.р., | Уі.б. | ті.б, | Uопор., | Іопор., | tнап, |
|---|------------------|-------------------|---------|--------|---------------|-----------|---------|---------|-------|
| | | рт.ст. | В | хв | В, | хв | В | А | хв |
| 1 | TiNx1 (реж.1) | $3 \cdot 10^{-3}$ | 1500 | 2-2,5 | 500 - 1000 | 1,5- 2 | 250 | 90 | 20 |
| 2 | TiNx1 (реж.2) | $3 \cdot 10^{-4}$ | 1500 | 2-2,5 | 500 - 1000 | 1,5- 2 | 250 | 90 | 20 |

3.4 Обладнання та методика вимірювання шорсткості зразків з покриттями.

Поверхня твердого тіла навіть добре відшліфованого далеко не рівна. На ній є мікровиступи, западини, тріщини; часто ця поверхня покрита окислами, прилиплими шарами газу чи рідини, сторонніми включеннями. Природно, що зачеплення цих виступів перешкоджатиме переміщенню тіл, що стикаються, один щодо одного.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | ДРМТВАТАМ 23.18093.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 64 |

Шорсткістю поверхні називають сукупність нерівностей поверхні з відносно малими кроками, виділену за допомогою базової довжини. Базова довжина l - довжина базової лінії, що використовується для виділення нерівностей, що характеризують шорсткість поверхні. Базова лінія (поверхня) – лінія (поверхня) заданої геометричної форми, певним чином проведена щодо профілю (поверхні) та призначена для оцінки геометричних параметрів поверхні. Шорсткість є наслідком пластичної деформації поверхневого шару деталі, що виникає внаслідок утворення стружки, копіювання нерівностей ріжучих кромek інструменту та тертя його про деталь, виривання з поверхні частинок матеріалу та інших причин. Числові значення шорсткості поверхні визначають від єдиної бази, за яку прийнято середню лінію профілю m , тобто. базова лінія, що має форму поминального профілю та проведена так, що в межах базової довжини середнє квадратичне відхилення профілю до лінії мінімально.

Систему відліку шорсткості від середньої лінії профілю називають системою середньої лінії. Якщо визначення шорсткості обрати ділянку поверхні довжиною l , інші нерівності (наприклад, хвилястість), що мають крок більше l , не враховують. Для надійної оцінки шорсткості з урахуванням розсіювання показань приладу та можливої неоднорідності будови нерівностей вимірювання слід повторювати кілька разів у різних місцях поверхні та за результат зміни приймати середнє арифметичне результатів виміру на кількох довжинах оцінки. Довжина оцінки L -довжина, на якій оцінюють шорсткість. Вона може містити одну або декілька базових довжин l . Числові значення базової довжини вибирають із ряду: 0,01; 0,03; 0,08; 0,25; 0,80; 2,5; 8; 25 мм.

За Державним стандартом України, ДСТУ ISO 4287:2012, визначено номенклатуру з шістки параметрів оцінки шорсткості поверхні, з них, для характеристики шорсткості, вибирається декілька або один [23]. Ці параметри такі:

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | ДРМТВАТАМ 23.18093.000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 65 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

1) Висотні:

- R_a - середнє арифметичне відхилення профілю профілю в межах базової довжини);
- R_z - висота нерівностей профілю по 10 точках (сума середніх абсолютних значень глибин п'яти максимальних впадин профілю і висот п'яти максимальних виступів в межах базової довжини);
- R_{max} - максимальна висота профілю (відстань між лінією впадин і лінією виступів профілю в діапазоні базової довжини).

2) Крокові:

- S – величина середнього кроку виступів профілю (величина середнього арифметичного кроку нерівностей профілю за його вершинами в діапазоні базової довжини);
- S_m - величина середнього кроку нерівностей профілю по середній лінії (середнє арифметичне значення кроку нерівностей профілю в діапазоні базової довжини).

3) Висотно - кроковий:

- t_r - опорна відносна довжина профілю (відношення значення опорної довжини профілю до значення базової довжини, де r це величина рівня перерізу профілю) (рис. 3.5).

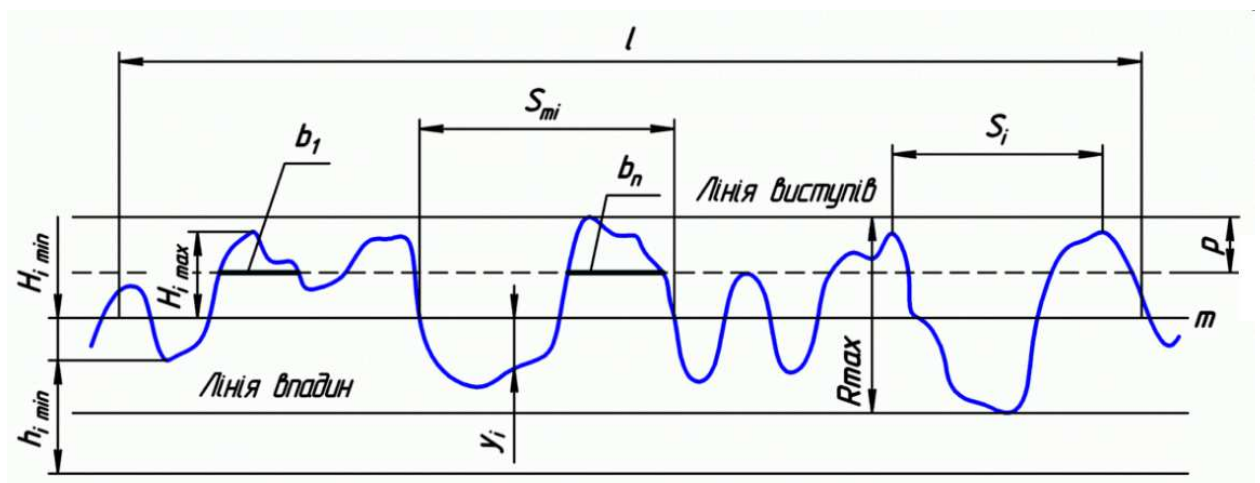


Рисунок 3.5 – Параметри характеристик шорсткості поверхні.

| | | | | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | Арк. |
| | | | | | | | | | 66 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | ДРМТВАТАМ 23.18093.000 ПЗ | | | | |

Виступи шорсткості на поверхні стінок розподіляються нерівномірно або рівномірно, в загальному випадку, вони можуть бути різної форми і розмірів.

Існує два методи контролю шорсткості: якісний та кількісний. Якісний контроль шорсткості поверхні здійснюють шляхом порівняння із зразками або зразковими деталями візуально або на дотик. ДСТУ 9378-75 встановлює зразки шорсткості, одержані механічною обробкою, зняттям позитивних відбитків гальванопластикою або нанесенням покриттів на пластмасові відбитки. Набори або окремі зразки мають прямолінійні, дугоподібні або дугоподібні розташування нерівностей поверхні, що перехрещуються. На кожному зразку вказано значення параметра R_a (в мкм) та вид обробки зразка.

Візуально можна задовільно оцінити поверхні $R_a = 0,6 \dots 0,8$ мкм і більше. Для підвищення точності використовують щупи та мікроскопи порівняння, наприклад, типу МС-48.

Кількісний контроль параметрів шорсткості здійснюють безконтактними методами (за допомогою приладів світлового перерізу типу МІС-11 та ПСС-2, мікроінтерферометрів, імерсійно-репликових мікроінтерферометрів МІІ-10, типу МІІ-4, МІІ-9, МІІ-П, МІІ-12, растрових вимірювальних мікроскопів типу ОРІМ-1 та ін.) та контактними методами за допомогою щупових приладів (профілометрів та профілактографів). При виборі методу та типу приладу необхідно враховувати можливість контролю запропонованого кресленням параметра, межі вимірювання, що допускаються відхилення контрольованого параметра, похибка вимірювання та приладу, продуктивність приладу, розміри та матеріал деталі та інші фактори. Контактні профілографи та профілометри, мають високу точність, застосовують для контролю найбільш відповідальних вимірів.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | ДРМТВАТАМ 23.18093.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 67 |

Для отримання більш достовірних даних нам необхідно виміряти шорсткість поверхні зразків до нанесення покриття та після цього, для цього ми використовуємо апарат профілограф-профілометр тип БВ-7669.

Профілограф - профілометр БВ-7669 (рисунок 3.6) призначений для вимірювання параметрів шорсткості зовнішніх та внутрішніх поверхонь, перетин яких у площині виміру представляє пряму лінію. Технічні дані приладу представлені в таблиці 3.4. Параметри шорсткості, що вимірюються, представлені у таблиці 3.5.



Рисунок 3.6 – Профілограф-профілометр БВ-7669.

Таблиця 3.4 – Основні технічні дані

| Параметр | Значення |
|---------------------------------------|----------------------|
| Вимірювані параметри шорсткості з | гідно з ISO 4287 |
| Ступінь точності | 1 |
| Максимальна довжина трасування | 10 |
| Швидкість трасування, мм/с | 0,5/1 |
| Базова довжина (відсікання кроку), мм | 0,08/0,25/0,8/2,5 |
| Фільтри | 2RC/2RC PC/Gauss/D-P |
| Діапазон вимірів (R), мкм | 0,05 ÷ 120 |

Закінчення таблиці 3.5.

| | | | |
|-------|---------------------------------|-----------------------|---------------------|
| l_0 | Відносна довжина профілю | $1 \div 10$ мкм. | 5% + 0,5% від шкали |
| L_0 | Довжина розтягнутого профілю | $100 \div 500000$ мкм | 5% + 0,5% від шкали |
| tr | Відносна опорна довжина профілю | $0 \div 100\%$ | 5% + 0,5% від шкали |

3.5 Методика і обладнання для визначення коефіцієнта тертя.

Для визначення коефіцієнтів тертя по покриттям застосовано спосіб визначення коефіцієнта тертя ковзання горизонтальної площині.

Сутність цього методу (рис. 3.7) у тому, що тіло А рухають з постійною швидкістю щодо тіла і вимірюють необхідну для цього силу P , оскільки рух тіла рівномірний, то сила тертя F дорівнює за величиною силі P і протилежна їй у напрямку [8].

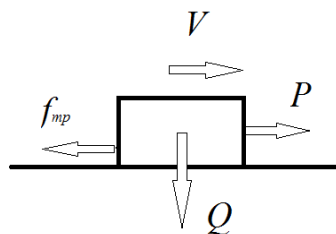


Рисунок 3.7 – Схема дії сил

Для визначення коефіцієнта тертя ковзання, в дипломній роботі, використовується прилад (трибометр) ТММ-32, та призначений для визначення коефіцієнта сухого тертя та тертя незмазаних тіл (рис. 3.8). Технічні характеристики установки ТММ-32 наведено в таблиці 3.6.

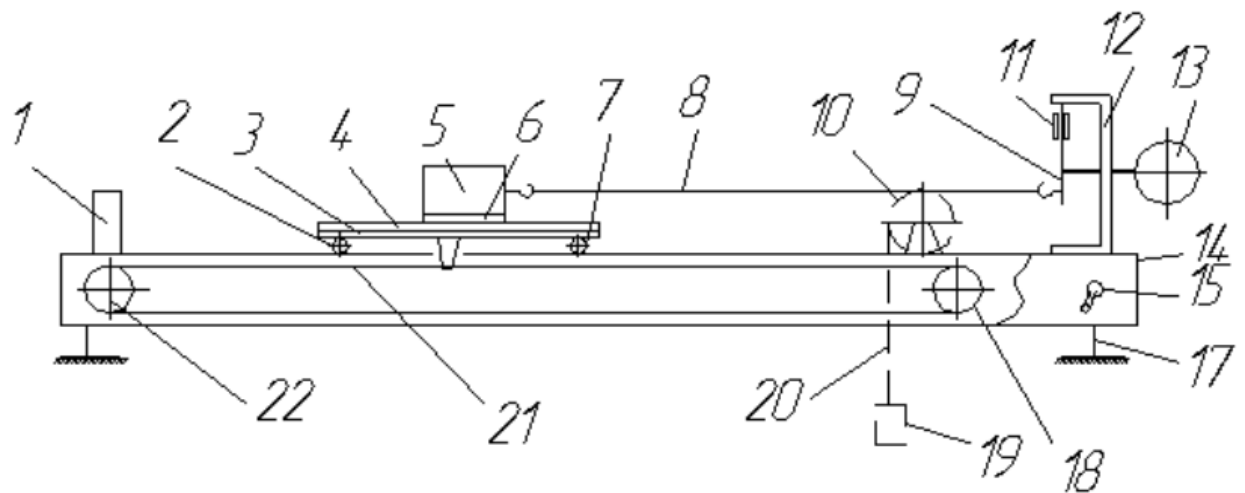


Рисунок 3.8 – Схема встановлення ТММ-32.

Основною частиною приладу є каретка 3, що має поступальне рух на роликах 2 на підставі 14. Рух каретки здійснюється за допомогою нескінченного троса 21, одягненого на ролики 18 і 22. Ролик 22 отримує обертання реверсивного електродвигуна через черв'ячний редуктор. На каретці 3 кріпляться змінні плити 4, виготовлені з різних матеріалів.

Верхня частина цих плит служить однією з площин тертя. На плиту укладається випробуваний зразок 5. Підставки 6 зразка змінні та виконані з різних матеріалів. Нижня поверхня їх є другою площиною тертя.

Для приведення площини тертя горизонтальне положення корпусу приладу 14 забезпечений настановними гвинтами 17. Зразок 5 за допомогою жорсткого троса 8 прикріпленого до балки 9, виконаної на пружинній загартованої сталі та закріпленої на кронштейні 12. До кронштейна 12 прикріплений також індикатор 13, який вимірювальним наконечником упирається в балку 9. При русі каретки 3 вліво зразок 5, що лежить на каретці, прагне зрушити разом з кареткою і тягне за собою через трос 8 балку 9, балка 9, починає згинатися, розвиває зусилля, яке утримує зразок 5 на місці, при цьому зразок 5 ковзає по плиті 4. Вага зразка дорівнює Q , сила тертя F , прикладена до зразка з боку каретки, дорівнює $f_{TP} \cdot Q$, де f_{TP} - коефіцієнт тертя між плитою 4 і основою 6. Ця сила тертя цілком без будь-

| | | | | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | Арк. |
| | | | | | | | | | 71 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | ДРМТВАТАМ 23.18093.000 ПЗ | | | | |

яких втрат сприймається балкою 9. Деформації вигину балки 9 вимірюються індикатором 13. Відлік показання шкали індикатора в міліметрах по допоміжній таблиці переводиться в ньютон і дає величину сили тертя. В силу стрибкоподібного характеру тертя та мінливості його величини для різних ділянок площини плити 4 відлік значень величини сили тертя візуально за шкалою індикатора 13 зробити не вдається. Стрілка індикатора 13 досить швидко коливається деякому діапазоні шкали. Можна відзначити крайні положення стрілки і відповідне їм середнє положення, отже, по індикатору 13 визначити лише середнє значення сили тертя.

Рух каретки 3 проводиться вправо чи вліво. Пуск здійснюється перемикачем 15. Зупинка каретки в крайніх положеннях автоматична, для чого в корпусі 14 приладу змонтовано два кінцеві вимикачі. Тарування показань індикатора проводиться за допомогою вантажів відомої ваги, підвішених на нитки 20 перекинутої через блок 10. Індикатор 13 встановлюється на нуль у той момент, коли 9 балка нічим не навантажена.

На рисунку 3.9 показана осцилограма запису сили тертя, визначеного на приладі ТММ-32, при жорсткому зв'язку між зразком 5 та вимірювальною балкою 9.

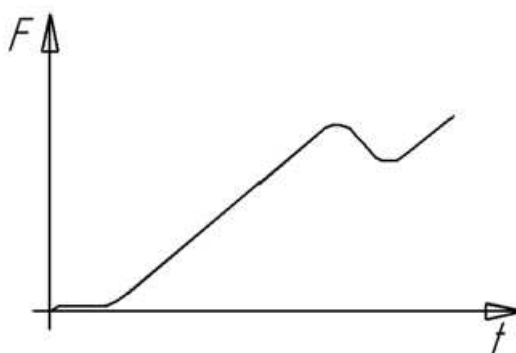


Рисунок 3.9 – Залежність зусилля руху каретки.

Порядок виконання досліджень.

1. Прилад ТММ-32 ставиться на краю столу з таким вильотом, щоб вантаж 19 (рисунок 3.8) вільно проходив, не зачіпаючи за стіл.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | ДРМТВАТАМ 23.18093.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 72 |

Встановлюється тарувальний ролик 10. До точної стрілки індикатора при знятому вантажі підводиться нульовий поділ шкали. Через ролик 10 перекидається нитка, один кінець якої прикріплюється до балки 9, до іншого кінця підвішується вантаж. Для кількох вантажів, різної величини, записують показання індикатора, складають тарувальний графік (рис. 3.10) і визначають масштабний коефіцієнт k (Н/мм) (відношення ваги вантажу до відповідного показання індикатора).

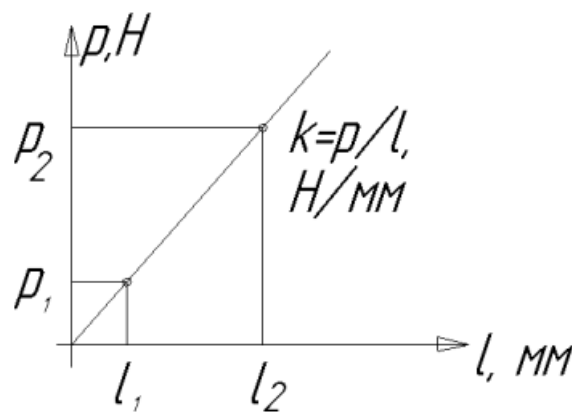


Рисунок 3.10 – Тарувальний графік.

2. Після закінчення тарировки пристрій знімають, прилад встановлюють на столі (за рівнем) в горизонтальному положенні і підключають до живлення. Змінні плити та кільця зразків протирають ганчіркою, змоченою бензином або розчинником, і дають їм висохнути.

3. Відповідно до зазначених викладачів поєднань матеріалів третьових тіл встановлюють на каретку 3 плиту 4 і кріплять, до вантажу 5 кільце 6.

Відлік за точною шкалою індикатора ставлять на нуль. Вантаж 5 та балку 9 з'єднують тягою 8.

4. Тумблером (вмикачем) 15 включають двигун 1, який починає повільно пересувати каретку вліво. Під час руху каретки знімають кілька відліків за індикатором. Середнє показання записують до бланку. Дослід повторюють тричі з різними поєднаннями матеріалів, результати записують

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | ДРМТВАТАМ 23.18093.000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 73 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

до протоколу. Сила тертя визначається як добуток відліку за індикатором на тарирувальний коефіцієнт k :

$$F = k \cdot L, \quad (3.1)$$

де L - відлік по індикатору в мм, що береться як різниця відліку при вимірюванні сили тертя та нульового відліку, з урахуванням грубої шкали індикатора.

Коефіцієнти тертя визначаються як відношення сили тертя F до ваги зразка Q :

$$f_{TP} = \frac{F}{Q}. \quad (3.2)$$

Таблиця 3.6 – Технічні характеристики установки ТММ-32

| Основні параметри приладу ТММ-32 | Од. вимірювання | Значення |
|--|-----------------|--------------|
| Максимальне відносне переміщення зразків | мм | 300 |
| Швидкість руху | м/сек | 0,1 |
| Вага випробуваних зразків | кг | 4,5 |
| Живлення двигуна | В | 127 |
| Максимальна сила тертя | кгс | 2,0 |
| Габарити | мм | 1540x140x205 |
| Потужність | Вт | 13 |
| Вага | кг | 40 |

РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ФРИКЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОКРИТТІВ.

4.1 Експериментальні дослідження хімічного складу зразків.

Експериментальні дослідження хімічного складу покриттів проводилося згідно з методикою, представленою в розділі 3, з використанням скануючого електронного мікроскопа JSM-6500 фірми «JEOL» високої роздільної здатності.

Перший зразок був виготовлений із T14K8, що належать до твердо сплавів. Вимірювання показників проводили з чотирьох різних точок, середнє арифметичне значення і стало показником.

У табл. 4.1 представлено середньо арифметичне значення, зняте з 4-х точок сплаву.

Таблиця 4.1 – Хімічний склад зразка із T14K8

| W | Ti | Co | Fe | V | Ca | S | Si | Al |
|-------|------|-----|-----|------|------|------|------|------|
| 76,43 | 12,6 | 7,5 | 1,2 | 0,27 | 0,43 | 0,35 | 0,73 | 0,47 |

З отриманих даних ми можемо точно бачити, що вибраний нами матеріал відноситься до сплавів T14K8 і в таблиці 4.2 наведено його основні характеристики і склад [5].

Другий зразок, зі сталі P9K5, це швидкорізальна сталь. Сталь володіє низькою схильністю до перегріву при загартуванні, має знижену в'язкість та підвищений опір зносу. Застосовується для обробки жароміцних сплавів і нержавіючих сталей, а також сталей підвищеної твердості. Характерні особливості даної сталі: середня зносостійкість та швидкість різання; досить висока експлуатаційна міцність. Отримані дані при вимірюванні з

| | | | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|--|--|------|
| | | | | | ДРМТВАТАМ 23.18093.000 ПЗ | | | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | | | 75 |

використанням електронного скануючого мікроскопа JSM-6500F вказані в таблиці 4.3.

Таблиця 4.2 – Склад та властивості сплаву T14K8.

| WC | TiC | Co | Твердість HRA, кгс/мм ² | Середній $\sigma_{зг}$ при вигині, кгс/мм ² | Щільність, г/см ³ |
|----|-----|----|---------------------------------------|---|---------------------------------|
| 78 | 14 | 8 | 89,5 | 125 | 11,2-11,6 |

Таблиця 4.3 – Хімічний склад зразка зі сталі P9K5.

| C | Fe | W | Co | Cr | V | Ca | S | Si |
|-----|------|-----|-----|-----|------|------|------|------|
| 0,9 | 75,2 | 8,7 | 7,5 | 4,2 | 1,95 | 0,43 | 0.03 | 0,55 |

З отриманих даних ми можемо точно бачити, що вибраний нами матеріал відноситься до сплавів P9K5 і в таблиці 4.4 наведено його основні характеристики та склад.

Таблиця 4.4 – Склад та властивості сплаву P9K5

| W | Co | Твердість HRC | Середні $\sigma_{зг}$ при згині, МПа, |
|---|----|---------------|---------------------------------------|
| 9 | 5 | 60-63 | 840 |

4.2 Результати вимірювань шорсткості зразків.

Експериментальне дослідження шорсткості поверхні покриттів проводилося згідно з методикою, представленою в розділі 2, з використанням профілактографа-профілометра типу AI модель 252 .

Профілограф-профілометр БВ-7669 є високочутливим приладом і призначений для вимірювання в лабораторних умовах шорсткості та хвилястості поверхні виробів. Вимірювання шорсткості проводилися для

отримання достовірних даних до нанесення покриття та після. Вимірювання знімалися з усіх боків зразка, пізніше усі зразки були пронумеровані.

Таблиця 4.5 – Показання профілографа-профілометра до нанесення покриття.

| Марка матеріалу | Значення Ra | | | | |
|-----------------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | № п/п | 1 | 2 | 3 | 4 |
| T14K8 | | 0,55-0,66 | 0,36-0,41 | 0,60-0,62 | 0,53-0,64 |
| P9K5 | | 0,21-0,42 | 0,36-0,62 | 0,37-0,53 | 0,73-1,05 |

Для нанесення покриття при режимі $P=3 \cdot 10^{-3}$ були обрані зразки № 2, 3 - T14K8; № 1, 4 - P9K5, а при $P=3 \cdot 10^{-4}$ були обрані № 1, 4 - T14K8; № 2, 3 - P9K5 (табл. 4.6).

За даними дослідження видно, що значення Ra до нанесення покриття і після практично не змінилася.

Таблиця 4.6 – Показники профілографа-профілометра після нанесення покриття

| | T14K8 | | P9K5 | |
|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | №2 | №3 | №1 | №4 |
| TiN 0,960 | | | | |
| Значення Ra | 0,33-0,41 | 0,50-0,59 | 0,32-0,42 | 0,36-0,73 |
| TiN 0,779 | | | | |
| Значення Ra | 0,54-0,60 | 0,50-0,59 | 0,40-0,60 | 0,32-0,45 |

4.3 Експериментальні дослідження фрикційних властивостей.

Визначення коефіцієнту тертя зразків виконували по методиці, описаній в пункті 3.5 на спеціальному трибометрі.

Для достовірності експерименту випробування проводилися п'ять разів, результуючим значенням було середнє значення $F_{тр}$.

Так само було проведено експеримент із зразком без покриття за тих самих умов. Як платівки, по якій рухаються зразки, були обрані титан (ОТ4), алюміній (Д16Т), сталь (Ст3), вони виконували роль оброблюваного матеріалу. Дані матеріали були обрані не випадково, оскільки вони широко застосовуються в машинобудуванні.

Даний експеримент проводився як при кімнатній температурі (без нагріву), так при температурі оброблюваного матеріалу $t=200$ °С (з нагріванням).

Насамперед було досліджено зразок Т14К8 без покриття при кімнатній температурі, ми послідовно збільшували навантаження P на зразок, порівнюючи отримані результати, ми вивели середнє арифметичне показання коефіцієнта тертя (табл. 4.7 та рис.4.1.)

Таблиця 4.7 – Зміна величини коефіцієнта тертя в залежності від марки оброблюваного матеріалу та величини навантаження на зразку з Т14К8

| Вага вантажу P , гр | Оброблюваний матеріал | | | | | |
|---|--------------------------|------|-----|---------------------------|----------|----------|
| | Сила тертя $F_{тр}$, гр | | | Коефіцієнт тертя $f_{тр}$ | | |
| | ОТ4 | Д16Т | Ст3 | ОТ4 | Д16Т | Ст3 |
| 20 | 8,5 | 6 | 5 | 0,425 | 0,3 | 0,25 |
| 30 | 12 | 8,2 | 7 | 0,4 | 0,273333 | 0,233333 |
| 60 | 21 | 17 | 15 | 0,35 | 0,283333 | 0,25 |
| 110 | 48 | 38 | 38 | 0,436364 | 0,345455 | 0,345455 |
| Середнє значення коефіцієнта тертя $f_{тр}$ | | | | 0,402841 | 0,30053 | 0,269697 |

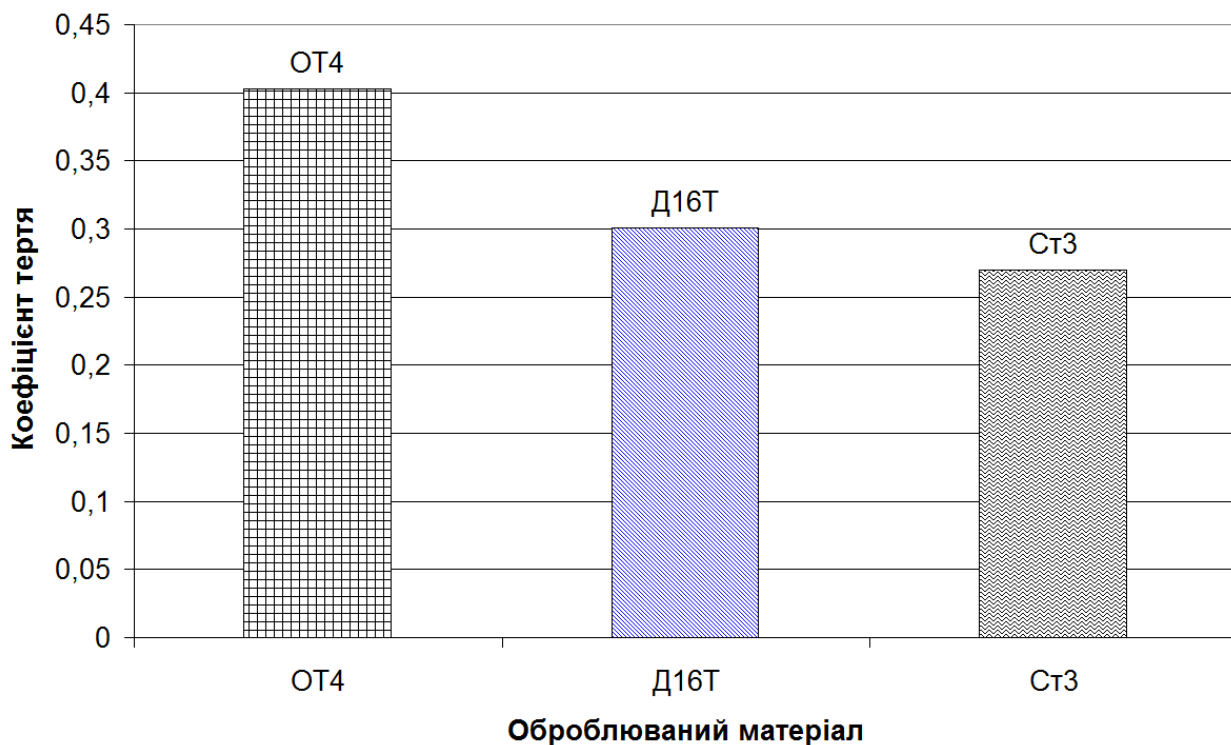


Рисунок 4.2 – Залежність коефіцієнта тертя від марки оброблюваного матеріалу на зразку з Т14К8

Для вивчення впливу нестехіометрії покриттів на фрикційні властивості, був проведений такий же експеримент, за тих же умов тільки як зразки були сплав Т14К8 з нестехіометричними покриттями TiN 0,96 і TiN 0,779. Результати наведено у табл. 4.9, та на рис. 4.3.

Таблиця 4.9 – Вимірювання величини коефіцієнта тертя в залежності від марки оброблюваного матеріалу та нестехіометричного складу покриттів

| Нестехіометричний склад покриттів | Коефіцієнт тертя $f_{тр}$ | | | |
|-----------------------------------|---------------------------|------|------|------|
| | Оброблюваний матеріал | OT4 | Д16Т | Ст3 |
| Т14К8 | | 0,41 | 0,30 | 0,27 |
| TiN 0,96 | | 0,34 | 0,23 | 0,36 |
| TiN 0,779 | | 0,34 | 0,32 | 0,24 |

На рис. 4.3. показані залежності коефіцієнта тертя $f_{тр}$ від матеріалу, що обробляється. З графіка ми бачимо, що сплав без покриття має більш високий коефіцієнт тертя.

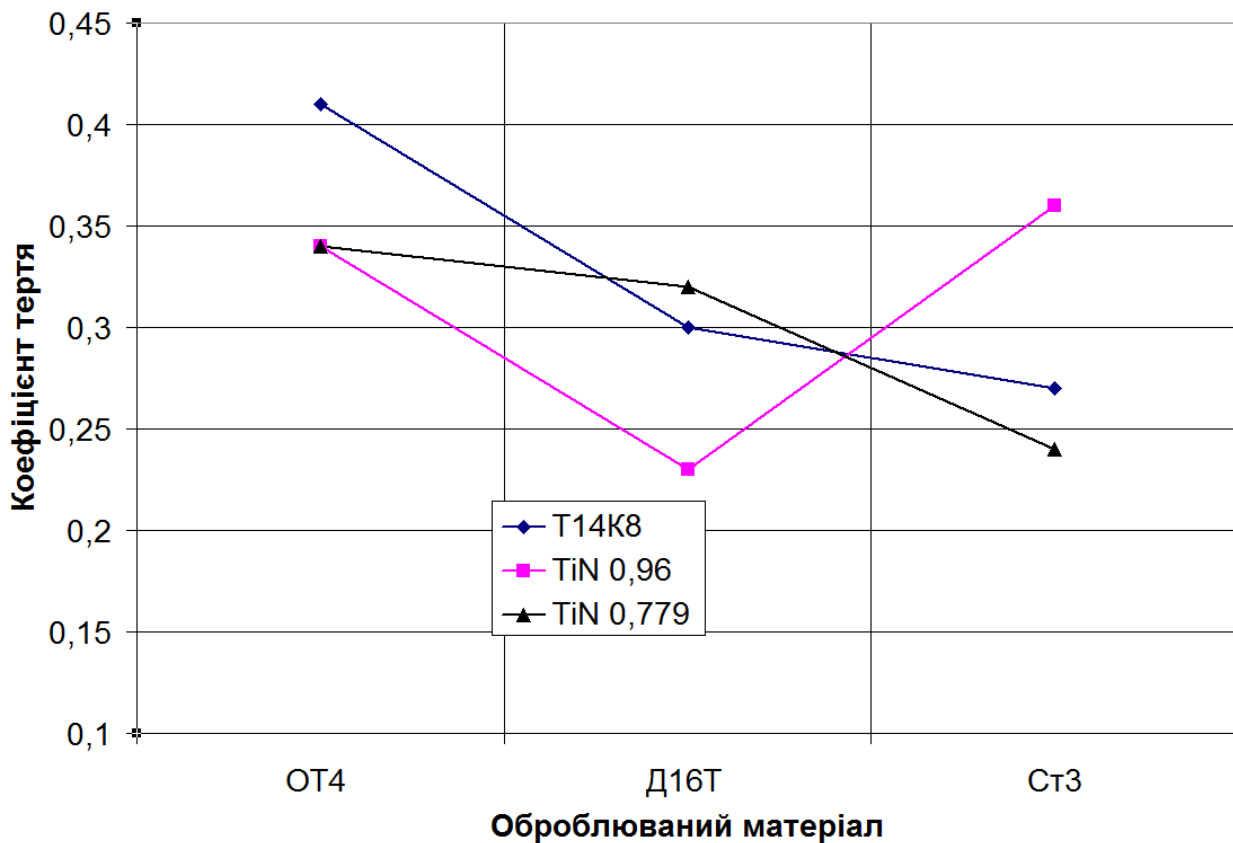


Рисунок 4.3 – Залежність коефіцієнт тертя $f_{тр}$ від нестехіометричного складу покриття та оброблюваного матеріалу для T14K8

Також з рис. 4.3 видно, що для обробки алюмінію краще використовувати різець із покриттям TiN 0,96. Найнижчий коефіцієнт тертя має пара TiN 0,779-Ст3.

Далі було проведено експеримент із другим видом зразків з Р9К5, на які також були нанесені нестехіометричні покриття (табл.4.10, рис.4.4). Експеримент проводився за таких самих умов.

Таблиця 4.10 – Вимірювання величини коефіцієнта тертя в залежності від марки оброблюваного матеріалу та нестехіометричного складу покриттів для Р9К5.

| Нестехіометричний склад покриттів | Коефіцієнт тертя $f_{тр}$ | | |
|-----------------------------------|---------------------------|------|------|
| | ОТ4 | Д16Т | Ст3 |
| Матеріал, що обробляється | | | |
| TiN0.96 | 0,32 | 0,21 | 0,23 |
| TiN0.779 | 0,31 | 0,23 | 0,22 |

З отриманих даних покриття нанесені на Р9К5 мають більш низький коефіцієнт тертя ніж Т14К8. але ми можемо спостерігати таку картину, що найнижчий коефіцієнт тертя, що з Р9К5 і Т14К8 має пара TiN 0,96-Д16Т.

Так як у процесі різання відбувається нагрівання заготовки та різального інструменту, нам необхідно з'ясувати, як впливає температура на коефіцієнт тертя.

Для даного експерименту ми нагріли зразок і матеріал, що обробляється до $t=200$ °С, вимірювання температури відбувалося з використанням термопари. У цьому експерименті також брали участь сплави Р9К5 і Т14К8. (табл. 4.11-4.12, рис. 4.5-4.7)

Як і на першому етапі експерименту насамперед ми розглянемо коефіцієнт тертя між Т14К8 (без покриття) і оброблюваним матеріалом.

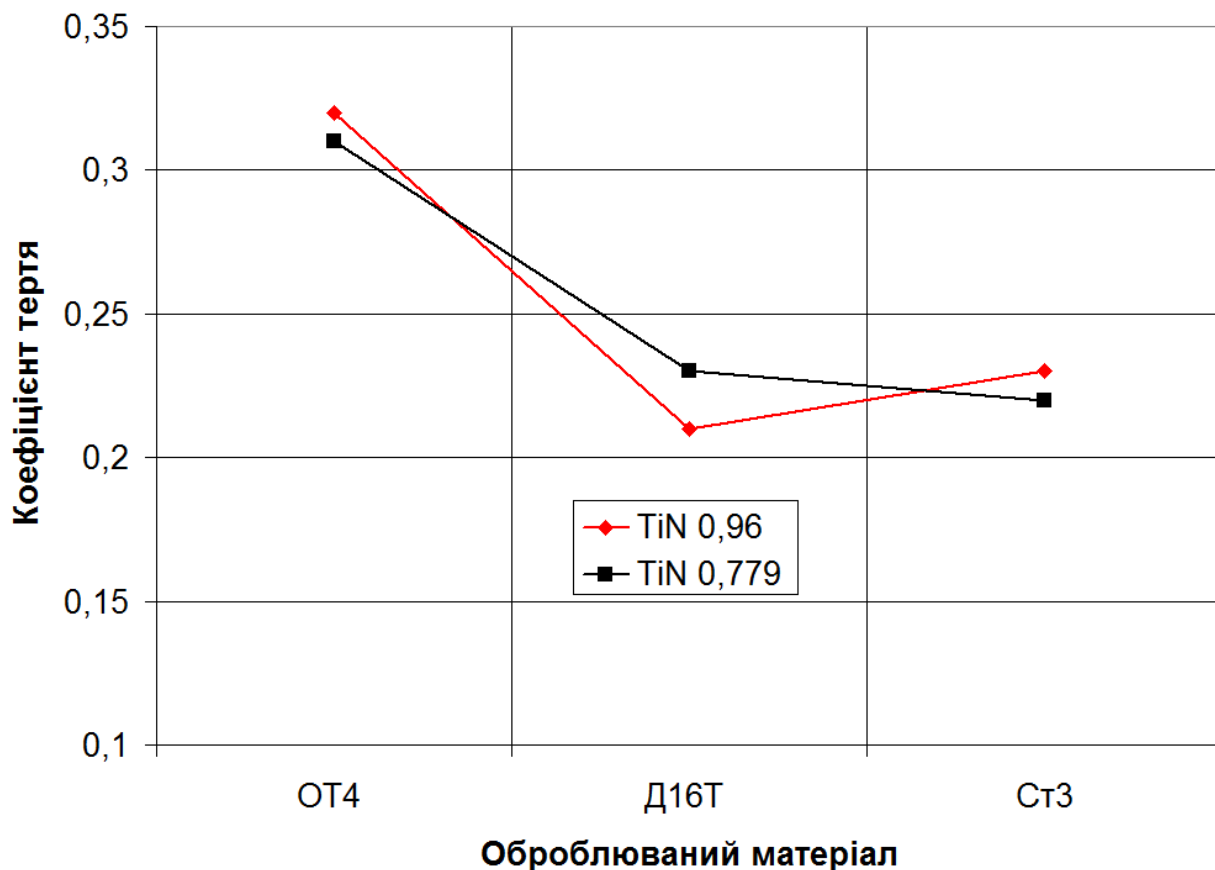


Рисунок 4.4 – Залежність коефіцієнт тертя $f_{тр}$ від нестехіометричного складу покриття та оброблюваного матеріалу для Р9К5

Таблиця 4.11 – Зміна величини коефіцієнта тертя в залежності від марки оброблюваного матеріалу та величини навантаження (P) ($t=200\text{ }^{\circ}\text{C}$)

| Вага вантажу P, гр | Оброблюваний матеріал | | | | | |
|---|--------------------------|------|------|---------------------------|------|------|
| | Сила тертя $F_{тр}$, гр | | | Коефіцієнт тертя $f_{тр}$ | | |
| | OT4 | Д16Т | Ст3 | OT4 | Д16Т | Ст3 |
| 20 | 11 | 8 | 6 | 0,55 | 0,4 | 0,3 |
| 30 | 13,5 | 10,4 | 10 | 0,45 | 0,35 | 0,33 |
| 60 | 22 | 21 | 16,9 | 0,37 | 0,35 | 0,28 |
| Середнє значення коефіцієнта тертя $f_{тр}$ | | | | 0,45 | 0,36 | 0,31 |

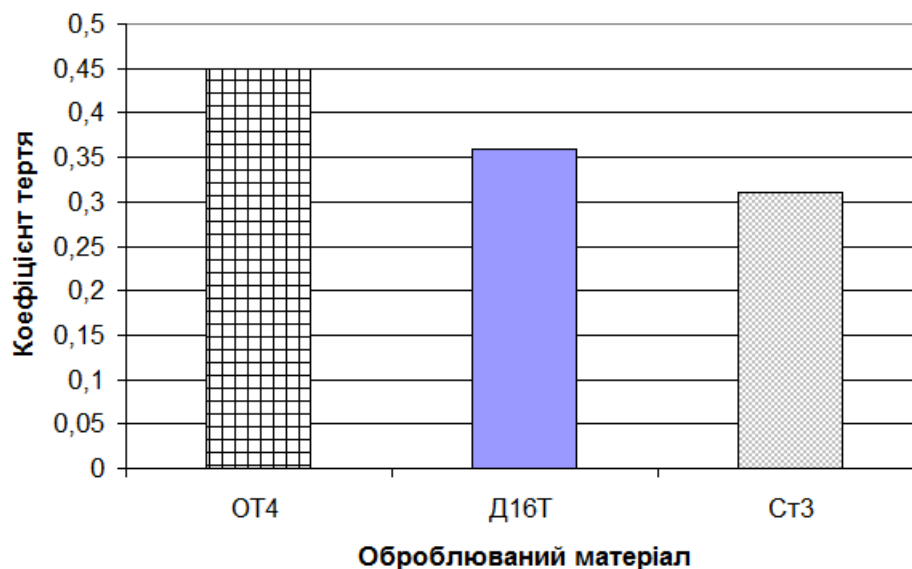


Рисунок 4.5 – Зміна величини коефіцієнта тертя залежно від марки матеріалу, що обробляється ($t=200\text{ }^{\circ}\text{C}$)

За експериментальними даними бачимо, що коефіцієнт тертя з нагріванням збільшився.

Як змінюється коефіцієнт тертя залежно від нестехіометричного складу покриття на сплав Т14К8 при нагріванні зразків розглянуто в (табл. 4.12, рис. 4.6).

Таблиця 4.12 – Вимірювання величини коефіцієнта тертя в залежності від марки оброблюваного матеріалу та нестехіометричного складу покриттів при $t=200\text{ }^{\circ}\text{C}$ на сплав Т14К8

| Нестехіометричний склад покриттів | Коефіцієнт тертя f_{tr} | | |
|-----------------------------------|---------------------------|------|-----|
| | OT4 | Д16Т | Ст3 |
| Матеріал, що обробляється | | | |
| TiN0.96 | 0,36 | 0,31 | 0,3 |
| TiN0.779 | 0,43 | 0,36 | 0,3 |

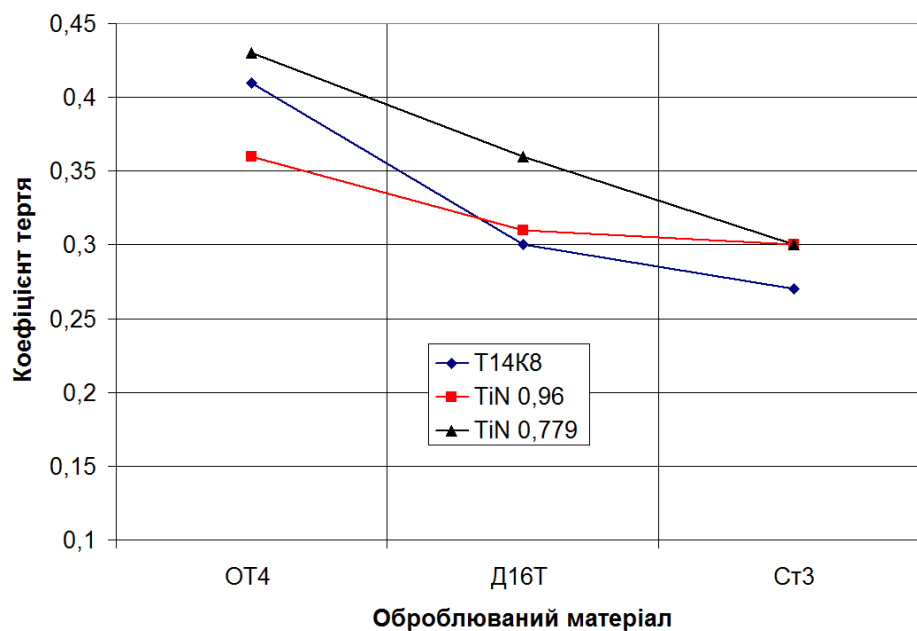


Рисунок 4.6 – Залежність коефіцієнт тертя $f_{тр}$ від нестехіометричного складу покриття та оброблюваного матеріалу $t=200\text{ }^{\circ}\text{C}$ на сплав Т14К8

З рис. 4.6. видно, що при нагріванні на $t=200\text{ }^{\circ}\text{C}$ коефіцієнт тертя для зразків з покриттям і без нього по Ст3 практично однаковий. При нагріванні найменший коефіцієнт тертя має пара TiN 0,96-Д16Т.

Сплави з Р9К5 з покриттями ми також нагріли і отримали такі результати (табл. 4.13, рис. 4.7).

Таблиця 4.13 – Вимірювання величини коефіцієнта тертя в залежності від марки оброблюваного матеріалу та нестехіометричного складу покриттів при $t=200\text{ }^{\circ}\text{C}$ для Р9К5

| Нестехіометричний склад покриттів | Коефіцієнт тертя $f_{тр}$ | | |
|-----------------------------------|---------------------------|-------|-------|
| | OT4 | Д16Т | Ст3 |
| Матеріал, що обробляється | | | |
| TiN0.96 | 0,397 | 0,29 | 0,294 |
| TiN0.779 | 0,394 | 0,334 | 0,272 |

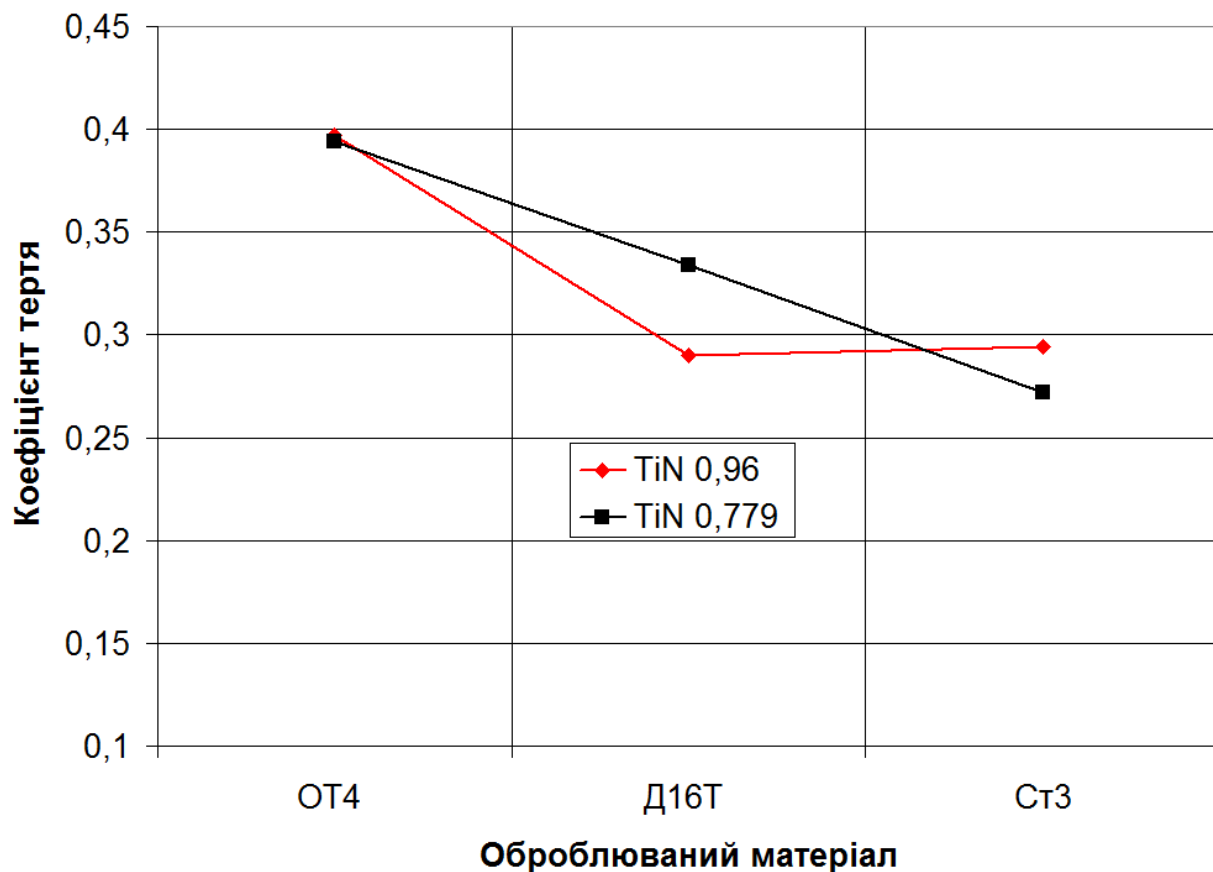


Рис 4.7. Залежність коефіцієнт тертя $f_{тр}$ від нестехіометричного складу покриття та оброблюваного матеріалу $t=200^{\circ}\text{C}$ для Р9К5

На рис. 4.7 спостерігається інша картина, коефіцієнт тертя по OT4 не залежить від нестехіометричного складу покриттів.

ВИСНОВКИ

1. Іонно-плазмовий метод напилення тонких зносостійких шарів – покриттів на різальний інструмент є найбільш перспективним методом у напрямі створення на поверхонь тертя з певними фрикційними властивостями.

2. Іонно-плазмовим методом напилення були отримані покриття з нестехіометричними складами TiN 0,96 та TiN 0,779 на матеріалах P9K5 та T14K8.

3. Зміна нестехіометричного складу дуже істотно впливає на експлуатаційні властивості покриттів, зокрема на фрикційні властивості.

4. Нестехіометричний склад впливає на коефіцієнт тертя. При обробці Ст3 коефіцієнт тертя $f_{тр}=0,358712$ для T14K8+TiN0,96 і $f_{тр}=0,241667$ для T14K8+TiN0,779.

5. Коефіцієнт тертя залежить не лише від складу покриття, а й від матеріалу основи (підкладки).

6. Найменший коефіцієнт тертя встановлений при обробці сплаву Д16Т різальним інструментом з P9K5 з покриттям нестехіометричного складу TiN 0,96 ($f_{тр}=0,210795$), а при обробці сплаву ОТ4- TiN 0,779 $f_{тр}=0,307765$.

7. Покриття з нітриду титану зменшує коефіцієнт тертя, швидкість зношування, ваговий знос і підвищує зносостійкість пар тертя при механічній обробці.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | ДРМТВАТАМ 23.18093.000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 86 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Wahlstrom U., Hultman L., Sundgren J.E., Adibi F., Petrov I., Green J.E. Temperature dependency of oxidation resistance of TiN coatings // Thin Solid Films. – 1993. – Vol. 235. – P. 62-69.
2. Veprek S., Nesladek P., Niederhofer A., Maneling H., Silek M. Superhard nfnocrystalline composites: present status of the research and possible industrial applications//Surface Engineering: Science and Technology I: The Minerals, Metals and Materials society. – 1999. – P. 219-231.
3. Veprek S. The search for novel, superhard materials//J. Vac. Sci. Technol. A. – 1999. – Vol. 17, № 5. – P. 2401-2420.
4. Karimi A., Wang Y., Cselle T., Morstein M. Fracture mechanisms in nano scale layered hard thin films//Thin solid films.– 2002.– Vol. 420-421. – P. 275-280.
5. Є.Г. Афтанділянц, О.В. Зазимко, К.Г. Лопатько. Матеріалознавство: Підручник. К.: Вища освіта, 2012.- с 548.
6. Паливо-мастильні матеріали, технічні рідини та системи їх забезпечення. К / Упор. В.Я.Чабанний. – Кіровоград: Центрально-Українське видавництво, 2008. – 353с
7. Закалов, О.В. Основи тертя і зношування в машинах: Навчальний посібник / О.В. Закалов, І.О. Закалов. – Тернопіль: Видавництво ТНТУ ім. І.Пулюя, 2011. – 322 с.
8. Закалов, О.В. Триботехніка і підвищення надійності машин [Текст]: О.В. Закалов. – Тернопіль: ТДТУ, 2000. – 354 с.
9. О.М. Дубовий, А.М. Степанчук Технологія напилювання покриттів: Підручник. – Миколаїв: НУК, 2007. – 236 с.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | ДРМТВАТАМ 23.18093.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 87 |

10. Нанесення покриття: Навч. посібник / В.М. Корж, В.Д. Кузнецов, Ю.С. Борисов, К.А. Ющенко; за ред. К.А. Ющенка. – Київ : Арістей, 2005. – 204 с.

11. Сучасні інструментальні матеріали у машинобудуванні : навчальний посібник / В. О. Залого, В. Д. Гончаров, О. О. Залого; за заг. ред. В. О. Залого. – Суми : Сумський державний університет, 2013. – 371 с.

12. High-frequency plasma at atmospheric pressure as a means of depositions of thin films / P.P. Melnychuk, V.A.Rudnitskyi // Технічна інженерія. – 2019. – № 2(84).

13. Рожков О.Д. Технологія нанесення покриттів. Частина II: Навч. посібник. – Дніпропетровськ: НМетАУ, 2008. - 38 с.

14. Корас В.М. Технологія та обладнання для напилення: Навч. посібник. – К.: НМЦ ВО, 2000. – 152 с.

15. Veprek S, Argon A.S., Zhang R.F. Origin of the hardness enhancement in superhard nc-TiN/ α -Si₃N₄ and ultrahard nc-TiN/ α -Si₃N₄/TiSi₂ nanocomposites//Philosophical Magazine Letters. – 2007. – Vol. 87, № 12. – P. 955-966.

16. Karvankova P., Veprek-Heijman M.G.J., Azinovic D., Veprek S. Properties of superhard nc-TiN/ α -BN and nc-TiN/ α -BN/ α -TiB₂ nanocomposite coatings prepared by plasma induced chemical vapor deposition//Surface and Coating Technology. – 2005. – Vol. 200. – P. 2978-2989.

17. Li S.Z., Fang Q.F., Liu Q., Li Z.S., Gao J., Nesladek P., Prochazka J., Veprek-Heijman M.G.J., Veprek S. Thermally activated relaxation processes in superhard nc-TiN/ α -Si₃N₄ and nc-(Ti_{1-x}Al_x) N/ α -Si₃N₄ nanocomposites studied by means of internal friction measurements// Composites Science and Technology. – 2005. – Vol. 65. – P. 735-740.

18. Pogrebnjak A.D. Structural properties of nanocrystallineTiN film / A.D.Pogrebnjak, A.M.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | ДРМТВАТАМ 23.18093.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 88 |

Mahmud// Proc. «New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Impementation». – Poland: Lublin University of Technology, 2011. – P. 172.

19. Vancoille E. Mechanical properties of heat treated and worn PVD TiN,(Ti, Al)N, (Ti, Nb)N and Ti(C, N) coatings as measured by nanoindentation / Van-coille E., Celis J.P., Roos J.R. // The solid films –1993. Vol.224 – P. 168-226.

20. Musil J. Hard and superhard nanocomposite coatings // Surf. Coat. Technol. – 2000. –No. 125. – P. 322-330.

21. Vancoille E. Mechanical properties of heat treated and worn PVD TiN,(Ti, Al)N, (Ti, Nb)N and Ti(C, N) coatings as measured by nanoindentation / Van-coille E., Celis J.P., Roos J.R. // The solid films –1993. Vol.224 – P. 168-226.

22. Випробування приладів і систем. Види випробувань та сучасне обладнання. Навчальний посібник – К.: НТУУ: «Київський політехнічний інститут» , 2009 – 64 с.: іл.

23. Електронний ресурс. Режим доступу:
https://uk.wikipedia.org/wiki/Roughness_uk.gif

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | ДРМТВАТАМ 23.18093.000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 89 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

ДОДАТКИ

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
| | | | | | ДРМТВАТАМ 23.18093.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 90 |