

Хмельницький національний університет
Факультет інженерії, трибології та матеріалознавства
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

Пояснювальна записка до дипломної роботи магістра

Галузь знань: 13 «Механічна інженерія»

Спеціальність: 132 «Матеріалознавство»


Освітньо-професійна програма: «Відновлення та технічний сервіс автомобілів»

на тему: «**Підвищення зносостійкості деталей типу підшипників і підпятників іонно-плазмовим напilenням**»

Шифр: МРТАМ 21.16115.000. ПЗ

Виконав: студент 2 курсу, група МТВАм -20-1,  Н.М. Мурашко

Керівник  д.т.н., проф. О.В. Диха

До захисту допускаю:
Зав. кафедри ТАМ  Диха О.В.

6 12 2021_р.

Хмельницький, 2021 р.

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

Освітньо-кваліфікаційний рівень: магістр
Галузь знань: 13 «Механічна інженерія»
Спеціальність: 132 «Матеріалознавство»
Спеціалізація: «Відновлення та технічний сервіс автомобілів»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Зав.кафедрою ТАМ
Диха О.В.
" 15 " жовтня 2021 р.

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ МАГІСТРАНТУ

Мурашко Нікіта Миколайович

1. Тема проекту:
«Підвищення зносостійкості деталей типу підшипників і підпятників іонно-плазмовим напиленням»

керівник проекту: Диха Олександр Володимирович, д.т.н., проф.

Затверджено наказом університету від 25 серпня 2021р. № 102

2. Строк подання студентом проекту на кафедру: 15.12.2021 р.

3. Вихідні дані до проекту:

- 1) *Технічні умови на технологію виготовлення деталей кузова автомобіля обробки деталей.*
- 2) *Річна програма зміцнення деталей.*
- 3) *Матеріали науково-дослідної практики.*
- 4) *Результати літературного огляду і патентного пошуку.*

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

1. *Технологічні методи інженерії поверхневих шарів і керування їх властивостями*
2. *Методика проведення досліджень*
3. *Результати досліджень та їх обговорення*
4. *Практичне застосування наноструктурованих покриттів нітриду титану*

5. Консультанти розділів роботи

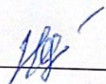
| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата | |
|--------|---|----------------|------------------|
| | | завдання видав | завдання прийняв |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

6. Дата видачі завдання: 15 жовтня 2020р.


КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів дипломного проекту (роботи) | Строк виконання етапів проекту (роботи) | Примітки |
|-------|--|---|----------|
| 1 | Технологічні методи інженерії поверхневих шарів і керування їх властивостями | 1.11.2021 | |
| 2 | Методика проведення досліджень | 15.11.2021 | |
| 3 | Результати досліджень та їх обговорення | 1.12.2021 | |
| 4 | Практичне застосування наноструктурованих покриттів нітриду титану | 5.12.2021 | |
| 5 | Оформлення пояснювальної записки | 15.12.2021 | |
| 6 | Оформлення презентаційних матеріалів | 15.12.2021 | |

Студент

 Мурашко Н.М.

Керівник роботи

 Диха О.В.

РЕФЕРАТ

Обсяг пояснювальної записки – 105 сторінок, кількість рисунків – 47, таблиць – 10, додатків – 2, кількість джерел згідно із переліком посилань – 98.

Студент гр. МТВАм-20-1 Мурашко Н.М.

Тема **«Підвищення зносостійкості деталей типу підшипників і підпятників іонно-плазмовим напиленням»**

Дана магістерська дипломна робота спрямована на підвищення працездатності, довговічності і надійності пари тертя «напіввісь- підшипник», яка є відповідальним вузлом тертя.





Відповідно до вказаної мети роботи були поставлені і вирішені наступні завдання:

- 1) розробка технологічного процесу іонно-плазмового напилення і вибір оптимального режиму нанесення зносостійкого наноструктурованого покриття нітриду титану на сталеву деталь «Піввісь» відповідальною пари тертя «піввісь-підшипник»;
- 2) вибір більш теплостійкою марки сталі для виготовлення деталі «піввісь» для пари тертя «піввісь-підшипник»;
- 3) випробування працездатності модифікованих пар тертя

Перелік ключових слів: підшипник, зміцнення, плазмове напилення, нітрид титану, наноструктурне покриття

ЗМІСТ

| | |
|--|----|
| ВСТУП..... | 6 |
| РОЗДІЛ 1. ТЕХНОЛОГІЧНІ МЕТОДИ ІНЖЕНЕРІЇ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ І КЕРУВАННЯ ЇХ ВЛАСТИВОСТЯМИ..... | 8 |
| 1.1. Питання машинобудування, що стосуються поверхні твердого тіла..... | 8 |
| 1.2. Хімічне осадження з газової фази - CVD-технології..... | 11 |
| 1.3. Фізичне осадження з парової фази - PVD-технології..... | 15 |
| 1.3.1.Метод КІБ - конденсація з іонним бомбардуванням..... | 15 |
| 1.3.2. Метод магнетронного розпилення..... | 17 |
| 1.3.3. Метод вакуумно-дугового випаровування..... | 21 |
| 1.4. Іонна імплантація - як метод модифікування поверхневих шарів матеріалу виробу..... | 29 |
| 1.5. Наукові тенденції в розробці конструкційних нанокристалічних матеріалів..... | 33 |
| РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ..... | 38 |
| 2.1. Об'єкти досліджень..... | 38 |
| 2.2. Обладнання, що використовується для модифікації робочих поверхонь пар тертя..... | 40 |
| 2.3. Вимірювання мікротвердості..... | 42 |
| 2.4. Методика визначення характеристик пластичності, одержуваних при вимірюванні мікротвердості..... | 42 |
| 2.5. Визначення зносостійкості..... | 44 |

| | | | | |
|--|------|----------|---|-------|
| МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | | | | |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |
| | | Мурашко |  | |
| | | Диха |  | |
| | | Бабак |  | |
| | | Диха |  | |
| Підвищення зносостійкості деталей типу підшипників і підпятників іонно-плазмовим напиленням | | | Літ. | Аркуш |
| | | | 4 | 105 |
| ХНУ, гр. МТВАм-20-1 | | | | |

ВСТУП

Основними показниками якості відповідальних вузлів машин є надійність, працездатність і коефіцієнта корисної дії, які, переважно, визначаються властивостями поверхневих шарів деталей, - твердістю, коефіцієнтом тертя, зносостійкість, корозійну стійкість і ін. Кожен останок машини через пошкодження її окремих елементів або зниження технічних характеристик нижче допустимого рівня, як правило, тягне за собою матеріальні збитки, а в окремих випадках призводить до катастрофічних наслідків. Досягнення високої експлуатаційної надійності машин можливо на основі застосування наукоємних технологій управління функціональними властивостями деталей машин за рахунок спрямованого створення поверхневих шарів з заданими властивостями,

Сучасні матеріали конструкційного, інструментального та функціонального призначення, повинні мати високі значення твердості, зносостійкості, втомної міцності і корозійної стійкості. В даний час це досягається такими технологічними методами, як нанесення плівок, покриттів і захисних шарів; зміна фізико-хімічних властивостей поверхневих шарів основного матеріалу деталі методами модифікування; комбіновані методи обробки, що поєднують модифікування поверхні і нанесення покриттів. У конкретних випадках завдання вибору цих методів представляє складну техніко-економічну задачу, рішення якої є актуальною і для трибології.

Мета роботи. Метою магістерської роботи є підвищення працездатності, довговічності і надійності пари тертя «напіввісь- підшипник», яка є відповідальним вузлом тертя.

Відповідно до вказаної мети роботи були поставлені і вирішені наступні завдання:

1) розробка технологічного процесу іонно-плазмового напилення і вибір оптимального режиму нанесення зносостійкого наноструктурованого покриття

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 6 |

нітриду титану на сталеву деталь «Піввісь» відповідальною пари тертя «піввісь-підшипник»;

2) вибір більш теплостійкою марки сталі для виготовлення деталі «піввісь» для пари тертя «піввісь-підшипник»;

3) випробування працездатності модифікованих пар тертя.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 7 |

РОЗДІЛ 1. ТЕХНОЛОГІЧНІ МЕТОДИ ІНЖЕНЕРІЇ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ І КЕРУВАННЯ ЇХ ВЛАСТИВОСТЯМИ

1.1 Питання машинобудування, що стосуються поверхні твердого тіла

Важливу, а в ряді випадків визначальну роль відіграють в машинобудуванні питання, що стосуються поверхні твердого тіла. Як відомо, причина низького ресурсу і надійності деталей машин і пристроїв, які завжди працюють в контакті з навколишнім або експлуатаційної середовищем (повітря, вакуум, морська вода, ґрунт і ін.); із середовищами, використовуваними для здійснення робочого циклу (наприклад, в енергетичних установках - паливо і теплоносії, в вузлах тертя - мастильні матеріали і т. д.), пов'язана переважно з механічним зносом і корозійних пошкодженням їх поверхневих шарів.

Підвищений знос деталей в зчленуваннях в одних випадках порушує герметичність робочого простору машини, в інших - порушує нормальний режим мастила. В результаті зношування знижується потужність двигунів, збільшується витрата паливно-мастильних матеріалів, падає продуктивність; виникає можливість витoku отруйних і вибухонебезпечних продуктів через сальники і ущільнення (погіршення екології довкілля); знижуються тягові якості транспортних машин, погіршується управління літаками і автомобілями (знижується безпека руху); зменшується продуктивність; знижується точність і якість обробки виробів на металорізальних верстатах і т.д.

Знос і пошкодження поверхонь знижують опір втоми деталей і можуть служити причиною їх руйнування навіть при незначних концентраціях напруг. Підвищений знос порушує нормальну взаємодію деталей у вузлах, може викликати значні додаткові навантаження, удари в сполученнях і вібрації, стати причиною раптових руйнувань. З підвищеним зносом нерідко пов'язаний неприпустимий шум в машинах і установках.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 8 |

Відносні розміри зносу (наприклад, ставлення втрати маси машини або виробу до її початкової маси) дуже малі, але знос може привести до виходу з ладу всієї машини або виробу в цілому. 85 - 90% машин виходить з ладу через знос деталей [1]. Витрати на ремонт і технічне обслуговування машини в кілька разів перевищують її вартість: для автомобілів - в 6 разів, для самолетов - до 5 разів, для станков - до 8 разів.

Надзвичайно важливі для надійності і працездатності машин проблеми трибології також є, по суті, проблемами поверхні твердого тіла і її взаємодії з навколишнім середовищем. Трибологические явища виявляються практично у всіх сферах індустрії. Для зниження втрат на тертя тільки в Росії витрачається понад 700 тис. Т мастильних матеріалів на рік [2]. Відпрацьовані мастильні матеріали повинні піддаватися переробці або утилізації, інакше вони представляють серйозну небезпеку для навколишнього середовища.

Відомо, що більше половини палива, споживаного автомобілями, тепловозами і іншими видами транспорту, витрачається на подолання опору, створеного тертям в рухливих з'єднаннях. У текстильному виробництві на подолання опору тертя витрачається близько 80% споживаної енергії. Низькі ККД багатьох машин обумовлені, головним чином, великими втратами на тертя. Так, ККД глободной редуктора, що встановлюється в ліфтах, металорізальному обладнанні, шахтних підйомниках та іншому обладнанні, в приробиться стані становить лише 0,65-0,70, а в такої поширеної парі, як «гвинт - гайка», всього лише 0,25 [1, 3-5]. Енергія при терті не просто втрачається, а перетворюється в теплоту, що нагріває механізми і вузли машин. Їх надмірне нагрівання в багатьох випадках призводить до відмов і аварій. За повний цикл експлуатації машин експлуатаційні витрати, трудомісткість ремонту і витрати матеріалів на ремонт в кілька разів перевищують витрати на виготовлення нових машин. Ремонт обладнання в розвинених країнах зайнято близько 30% загального числа робітників і

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 9 |

приблизно така ж частина верстатного парку [1]. Такі значні витрати обумовлені недооцінкою значущості проблем підвищення зносостійкості, довговічності і надійності машин як експлуатованих, так і проєктованих.

Усунення або гальмування процесів, що протікають на кордоні «Середовище - метал», захист матеріалів від зносу і корозії (що негативно позначається на працездатності і надійності різних деталей і вузлів), є однією з найважливіших проблем машинобудівної галузі, успішне вирішення якої дозволить підвищити якість і довговічність роботи обладнання і машин, істотно збільшити продуктивність праці, заощадити величезні матеріальні, енергетичні і трудові ресурси.

Всі технологічні методи інженерії поверхні або спрямованого створення поверхневих шарів і управління їх властивостями можна розділити на наступні групи:

- зміна фізико-хімічних властивостей поверхневих шарів основного матеріалу виробу методами модифікування;
- нанесення плівок, покриттів і захисних шарів;
- комбіновані, що поєднують методи модифікування і нанесення покриттів.

Сама по собі завдання вибору цих методів в конкретних випадках представляє складну техніко-економічну задачу.

Всі методи можна умовно поділити на дві великі групи:

- 1) технології, засновані на фізичних процесах;
- 2) технології, засновані на хімічних процесах.

Серед всіх наголоорієтованих технологій обробки поверхні на сьогоднішній день найбільш перспективними є іонно-вакуумні технології нанесення покриттів - PVD (Physical Vapour Deposition -

«Фізичне осадження з парової фази») і CVD (Chemical Vapour Deposition - «Хімічне осадження з газової фази») технології (рисунк 1.1) [6].

Склад і властивості одержуваних покриттів в значній мірі залежать від техніки і технології їх нанесення. До цього дня актуальні технології

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 10 |

нанесення зносостійких покриттів таких, як TiN, TiCN, TiAlN і т.п.

Результати фундаментальних досліджень нанокристалічних плівок і покриттів представлені багатьох роботах [7-20].

Покриття та плівки нітриду титану (TiN) відомі вже давно, але вони не втрачають своєї актуальності, оскільки володіють унікальним поєднанням властивостей: високі значення твердості, зносостійкості, температури плавлення, а також хімічна інертність і термодинамічна стабільність, висока електро- і теплопровідність [21- 23]. Дані якості визначили широку область їх застосування в якості захисних, корозійностійких, декоративних і бар'єрних шарів - різні галузі машинобудування, електроніка, медицина [24-32].

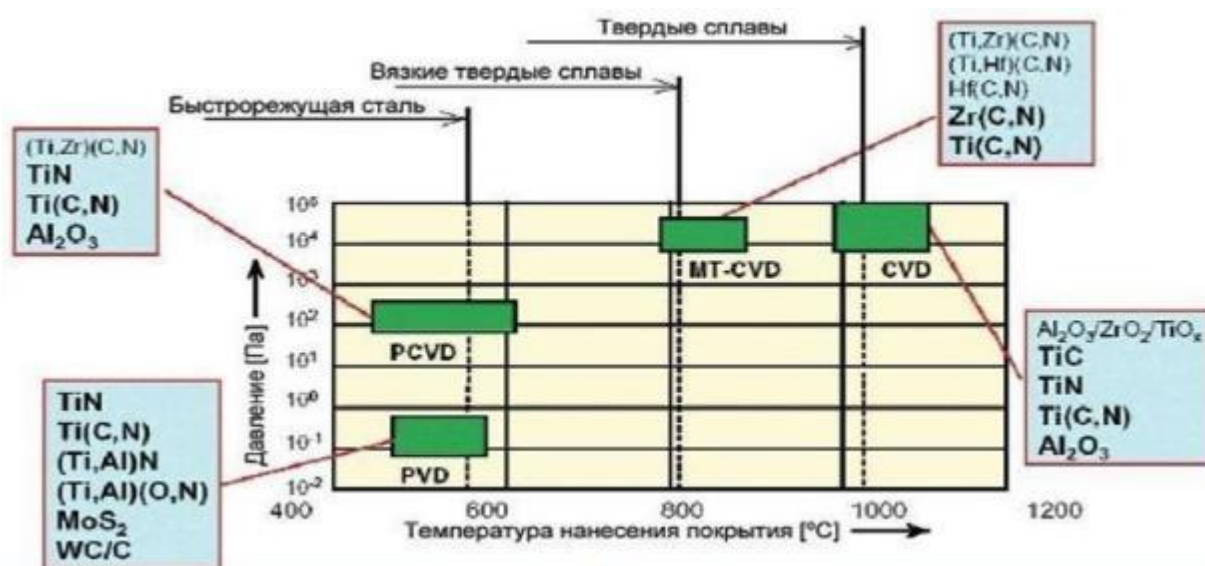


Рисунок 1.1 - Методи нанесення покриттів [6]

Покриття та плівки нітриду титану синтезують різними способами [33,34]. В даний час для досягнення найкращих експлуатаційних характеристик покриттів і плівок необхідно удосконалювати методи їх отримання.

1.2 Хімічне осадження з газової фази - CVD-технології

В основі CVD-методу лежать хімічні реакції, що протікають в безпосередній близькості або на поверхні оброблюваного матеріалу. Матеріал покриття осідає з газового середовища (кисень, азот, вуглеводні),

| | | | | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | Арк. |
| | | | | | | | | | |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | | | | 11 |

рівномірність покриття забезпечується швидкістю потоку газу і надлишковим тиском в робочій камері, причому для протікання необхідних хімічних реакцій потрібна температура 800 - 1100 ° С. Дана умова істотно обмежує число матеріалів, на які можна нанести покриття CVD-методу.

Установки, що застосовуються для CVD-покриттів, залежно від призначення можуть мати різні конструктивні особливості, проте всі вони мають джерело реакційних газів, робочу камеру (реактор), пристрій нагріву підкладки і систему відкачування або регенерації газів. Реактори можуть мати різну форму і розміри, а процеси CVD протікати в широкому діапазоні тисків (від високого вакууму до декількох атмосфер) і температур. Реакційні гази можуть подаватися з балона зі стисненим газом або генеруватися в спеціальному реакторі. Передбачаються пристрої для контролю витрат газу, його тиску, температури і т.д. Деталі, на які наносять покриття, можуть нагріватися печами електроопору або індукторами. Для управління протіканням хімічних реакцій потрібен ретельний контроль параметрів процесу.

Метод хімічного осадження практично не має обмежень за хімічним складом формованих покриттів. Які покриття утворюються, залежить від комбінації матеріалів і параметрів процесу [35-39]. Якщо процес протікає при заповненні простору реакційно-здатним газом - киснем, азотом або вуглеводнями, то в результаті хімічної реакції між атомами zagrożених металів і молекулами газу відбувається нанесення оксидних, нітридних та карбідних покриттів. Склад покриття залежить від парціального тиску газу і швидкості осадження покриття.

В даний час основні види покриттів, одержувані CVD-методом, це - TiN, TiCN і Al₂O₃. Метод забезпечує отримання покриттів товщиною 1-20 мкм зі швидкістю осадження 0,01-0,1 мкм / хв [40]. На рисунку 1.2 приведена принципова схема реактора для формування покриття TiN [41].

Освіта нітриду титану відбувається за реакцією:

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 12 |



TiCl₄, водень (H₂) і аміак (NH₃), взаємодіючи на поверхні гарячої підкладки, утворюють з'єднання TiN:



яке осідає у вигляді покриття. Пари, що утворюються соляної кислоти виводяться з реактора.

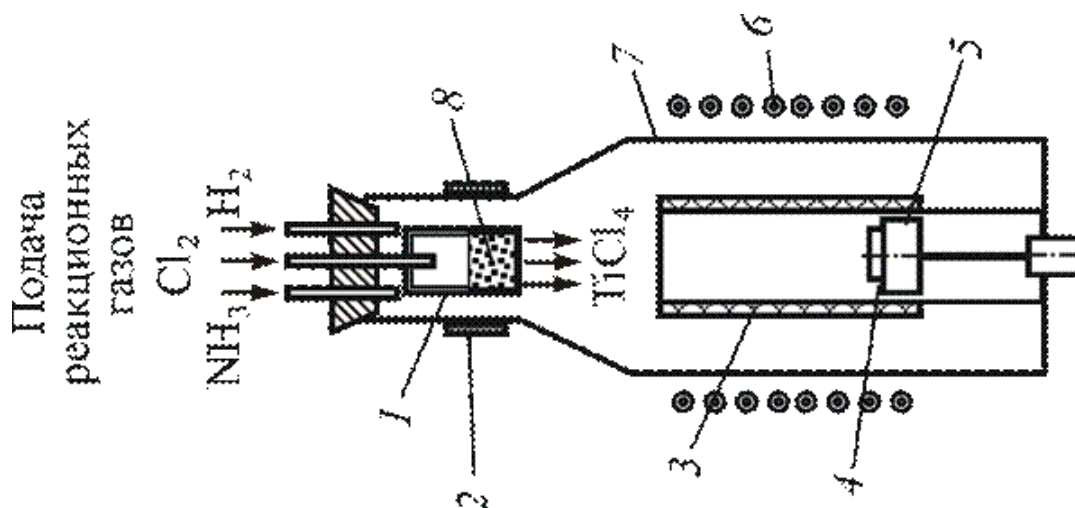


Рисунок 1.2 - Схема реактора для формування покриття TiN CVD-методом: 1 - газогенератор; 2 - піч; 3 - графітовий нагрівач; 4 – підкладка; 5 - стіл; 6 - індуктор; 7 - робоча камера; 8 - титанова стружка [41]

Метод CVD має такі переваги:

- відтворюваність рельєфу поверхні при наявності на поверхні сходинок або канавок, товщина покриття практично однакова як на вертикальних, так і на горизонтальних ділянках;
- універсальність - можливість отримання покриття практично будь-якого складу;
- гнучкість процесу - можливість легкого варіювання параметрів процесу осадження, тим самим, змінюючи структуру покриття;
- можливість нанесення одно- і двосторонніх покриттів на деталі складної

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 13 |

форми і великої площі;

- можливість досягнення високих швидкостей осадження (до декількох міліметрів на годину) при збереженні високої якості покриття;
- мала чутливість до якості обробки поверхні матеріалу, на який потрібно нанести покриття.
- порівняльна простота обладнання через відсутність необхідності наведення вакууму.

Крім достоїнств у методу CVD існують і недоліки. Основним з них є необхідність нагрівання деталей до високих температур, тому даний метод абсолютно непридатний для створення покриття на виробах з швидкорізальної сталі, так як суттєво погіршує механічні властивості матеріалу підкладки внаслідок супутнього термічного відпуски. З цієї причини покриття наноситься, в основному, на інструмент з твердих сплавів і кераміки, що володіють високою теплостійкістю.

Але навіть для твердих сплавів такі температури призводять до негативних наслідків - в поверхневому шарі спостерігається зниження в'язкості сплаву з покриттям в порівнянні з твердим сплавом без покриття. Це є наслідком обезуглероживання граничної зони та підвищенням крихкості поверхневої зони товщиною 3-5 мкм [6]. Для зниження впливу температури на властивості твердого сплаву використовують спосіб нанесення покриття CVD при температурах близько 800 ° С - середньотемпературна метод МТ-CVD, що дозволяє зменшити зниження в'язкості, але не вирішує повністю існуючу проблему. Поява градієнтних твердих сплавів із змінним по глибині складом і нанесення багат шарових покриттів дозволяють компенсувати зниження в'язкості сплаву під впливом температури при нанесенні покриття.

До недоліків методу CVD можна віднести і ряд наступних факторів:

- технологічне обладнання має складну систему підведення газів;
- гази, які використовуються для покриття, токсичні та

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 14 |

вибухонебезпечні; наявність великої кількості непрореагировавших компонентів - все це вимагає дотримання суворих заходів безпеки.

Перераховані вище фактори обмежують сферу застосування CVD-покривів. Хімічний метод застосовується для нанесення покривів на твердосплавний інструмент, який, в першу чергу, використовується для токарного оброблення. Такі пластини випускаються великими партіями і можуть забезпечити повне завантаження установок. Але, з іншого боку, з моменту появи технологія CVD залишається доступна спеціалізованим інструментальним підприємствам, які виробляють твердосплавну продукцію по повному циклу в масовому виробництві. Для випадків дрібносерійного виготовлення спеціального інструменту або для відновлення невеликих партій перезатачуваного інструменту дана технологія мало застосовна.

1.3 Фізичне осадження з парової фази - PVD-технології

1.3.1 Метод КІБ - конденсація з іонним бомбардуванням

PVD-метод або метод КІБ - конденсація з іонним бомбардуванням (назва методу в російськомовній літературі), як впливає з назви, має фізичну природу. Ця група методів об'єднана спільною схемою нанесення покриття з використанням вакууму. Спочатку матеріал для покриття перекладається з конденсованого стану в стан пара, потім проводиться його транспортування до підкладки (матеріалу на який наноситься покриття), де відбувається осадження матеріалу покриття з парової фази і формування покриття. Використання вакууму полегшує переклад матеріалу в парову фазу.

Нанесення покриття методом фізичного осадження проводиться при температурах до 450 ° С, що практично не накладає обмеження по матеріалу підкладки. PVD-процеси проходять в вакуумі (до 10-3 Па) або в атмосфері робочого газу при досить низькому тиску (~ до 1 Па), що необхідно для полегшення перенесення частинок від джерела (мішені) до виробу (підкладці) при мінімальній кількості зіткнень з атомами або молекулами газу.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 15 |

Існують різні варіанти методу фізичного осадження в залежності від способу переведення матеріалу з твердої фази в газоподібну

- використовують процеси випаровування і розпилення.

В даний час основними методами іонного осадження є:

- магнетронного розпилення іонним бомбардуванням;

- електродугове випаровування (або вакуумно-дугове).

Дані процеси протікають в середовищі інертного газу в присутності реакційного газу (наприклад, азоту та / або ацетилену) при подачі на підкладку негативного напруги зсуву. У робочій камері установки підтримується знижений тиск (~ 1 Па) або вакуум ($\sim 10^{-3}$ Па). Всі сучасні установки працюють по замкнутому технологічному циклу:

- завантаження матеріалу (підкладки);

- відкачка повітря з камери;

- нагрів камери і матеріалу підкладки зовнішнім джерелом і іонним бомбардуванням (при подачі позитивного напруги зсуву на підкладку);

- очищення матеріалу іонним травленням;

- випаровування або розпорошення і іонізація матеріалу мішені (наприклад, Ti) з подачею енергії, робочого газу (наприклад, Ar) і реакційного газу (наприклад, N₂ для освіти нітридів);

- перенесення частинок в середовищі іонізованого газу (плазми), зіткнення частинок і конденсація (при негативному напрузі зсуву на підкладці);

- охолодження камери і матеріалу;

- вивантаження.

На відміну від CVD-методу метод фізичного осадження вимагає ретельної попередньої підготовки матеріалу підкладки перед нанесенням покриття - необхідна послідовна відмивання в хімічних середовищах з ультразвуковою обробкою.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 16 |

1.3.2 Метод магнетронного розпилення

Метод магнетронного розпилення - іонну розпилення металів в магнетронном розряді - в даний час один з найпоширеніших методів нанесення захисних покриттів [42-49]. Робочая п'ятниця - чисті гази Ar, N₂, O₂, CH₄, тиск 0,05 - 1 Па, температура 60 ... 600 ° C; одержувані покриття - металеві покриття (Al, Ag, Au, Cu, Zn, Sn, Cd, Ti, Zr, Hf, Cr, Ta, Ni, Co, Si, MCrAlY (M = Ni, Co)), металокерамічні покриття (: TiN, ZrN, CrN, TiC, TiCN, ZrON, TiAlN, AlCrN, TiBN CrAlTiYN, TiO₂, ZrO₂, Al₂O₃, SiO₂); нанокompозити (TiAlN / Si₃N₄, TiN / BN, AlCrN / Si₃N₄, ZrN / Cu, ZrO₂ / Al₂O₃, TiN / NbN, TiN / CrN, TiN / AlN, CrN / AlN, TiN / CN); алмазоподібні покриття.

З обладнання, що використовує метод розпилення, найбільше застосування знаходять установки на основі магнетронів (рисунок 1.3) [6, 24]. При додатку високої напруги в атмосфері інертного газу (як правило, аргону) виникає тліючий розряд. Іони інертного газу з плазми, що володіють високою енергією, вдаряються об мішень, включену як катод. За рахунок ударного імпульсу матеріал розпорошується, минаючи проміжну рідку фазу. У цьому випадку можливо довільне розташування мішеней. За допомогою магнітних полів (замкнених і розімкнених) шлях електронів подовжується (по спіралі уздовж ліній магнітного поля), збільшуються щільність плазми і ударна енергія. Позаду мішені розташовується магнітна система, яка визначає розподіл області розпилення матеріалу по всій поверхні мішені.

Процес магнетронного розпилення характеризується рядом технологічних параметрів, основними з яких є потужність розряду, тиск робочої суміші, склад робочої суміші, ступінь попереднього вакууму.

Автори статті [50] стверджують, що для отримання тонких покриттів нітриду титану (від 1 нм до 1 мкм) метод магнетронного розпилення підходить якнайкраще. Для забезпечення стабільності процесів осадження вигідно використовувати імпульсні магнетронні розпилювальні системи дуального типу [9, 51, 52]. На установці серії «Яшма» (при залишковому тиску

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 17 |

в робочій камері $5 \cdot 10^{-3}$ Па) при варіюванні відстані між площиною мішені і підкладкою (50-100 мм), а також швидкості потоку азоту в робочій камері отримані зразки TiN на кремнієвих підкладках.

В роботі [53] досліджено вплив параметрів осадження на мікроструктуру покриттів TiN, отриманих методом дуального магнетронного розпилення, на скляні підкладки на установці вакуумного напилення QUADRA 500TM при залишковому тиску в камері нижче $5 \cdot 10^{-3}$ Па, в газовому середовищі Ar і азоту N₂. При всіх режимах осадження покриття мали одну фазу нітриду титану з кубічної кристалічної структурою типу NaCl. На всіх рентгенограмах присутні дифракційні піки (111) і (222) TiN. Фрактограмми покриттів нітриду титану при різних режимах нанесення показані на рисунку 1.4 [53].

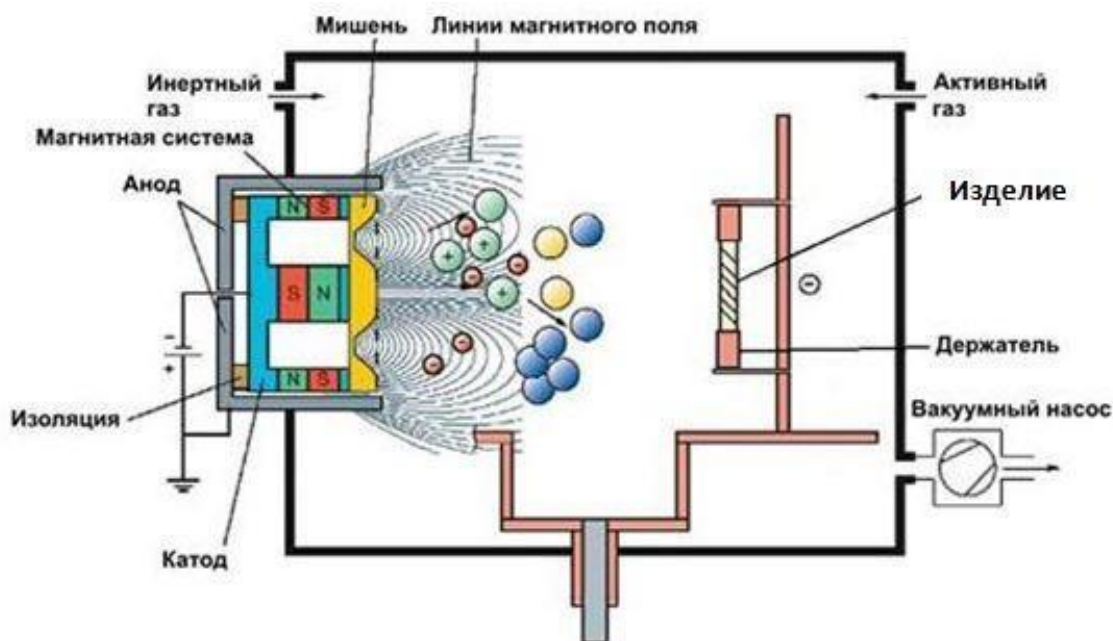


Рисунок 1.3 - Схема установки для нанесення покриття методом магнетронного розпилення [6]

Покриття характеризуються щільною дрібнодисперсною столбчатою

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 18 |

структурою, орієнтованої перпендикулярно поверхні покриття. При цьому стовпці характеризуються переривчастою структурою, що обумовлено, на думку авторів, зміною швидкості росту зерен при зміні щільності потоку. Автори стверджують, що при даних режимах нанесення покриттів можна отримати товщину покриття більше 3 мкм. Однак, аналізуючи фрактограмми (рисунок 1.4), можна стверджувати, що швидкість осадження покриттів при магнетронном розпиленні набагато нижче, ніж при методі вакуумно-дугового випаровування.

В роботі [54] представлені результати досліджень впливу режимів магнетронного розпилення на швидкість росту (V) тонких покриттів нітриду титану, загрожених на напівпровідникові підкладки, в залежності від потоку азоту (j_n) і потужності магнетронного розряду (P) при кімнатній температурі. Швидкість зростання покриттів TiN прямо пропорційна потужності магнетронного розряду і обернено пропорційна щільності потоку азоту (рисунок 1.5).

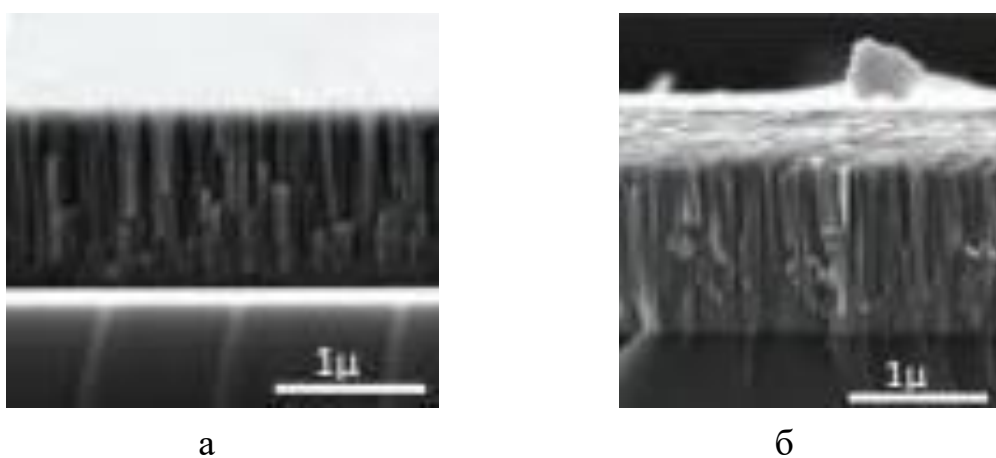


Рисунок 1.4 - Фрактограмми покриття нітриду титану: а - час нанесення 210 хв, сила струму магнетронів 6 А, напруга магнетронів 420 - 438 В, напруга зміщення 0 В, концентрація азоту 15%; б - час нанесення 270 хв, сила струму магнетронів 6 А, напруга магнетронів 480 - 500 В, напруга зміщення 45 В, концентрація азоту 20% [53]

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 19 |

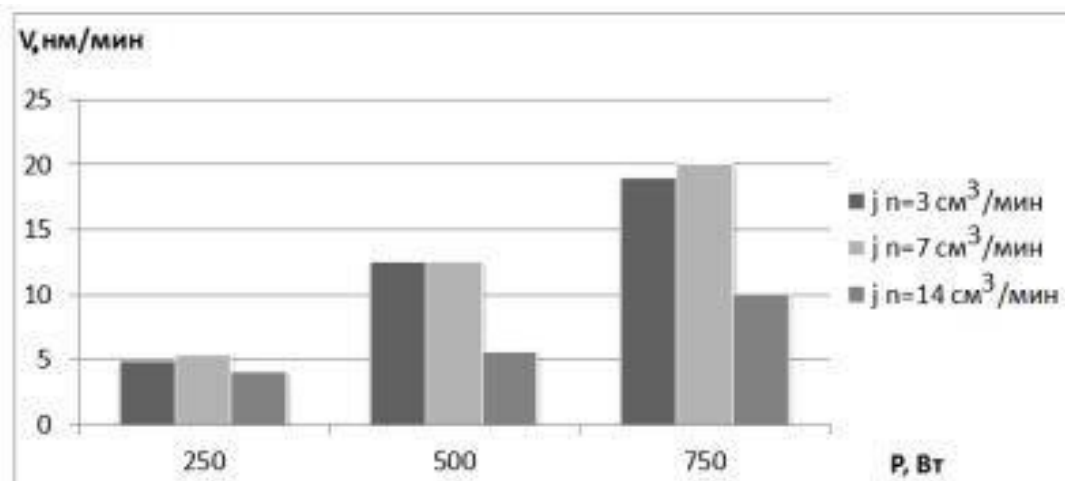


Рисунок 1.5 - Діаграма швидкості росту (V) покриттів TiN від потужності розряду (P) для різних потоків азоту [54]

При магнетронном розпиленні якість покриттів залежить від багатьох параметрів осадження - утримання реактивного газу в камері під час осадження, потужності струму, тиску, температури підкладки і напруги зсуву і ін. Покриття нітриду титану, отримані цим методом, мають високі фізико-механічними і [50, 55], трибологічних характеристик [56]. Однак, через низьку швидкості осадження товщина покриття при цьому не перевищує 1 мкм.

В даний час основною областю застосування покриттів нітриду титану магнетронного типу є мікроелектроніка, де вони використовуються як захисних покриттів [26, 45], в якості бар'єрів Шоттки [25], контактних шарів для сонячних елементів [57], антиотражаючим і антистатичних покриттів [58]. Існують установки магнетронного напилення, де покривная поверхню виробу практично не обмежена його довжиною, і цей фактор визначає область застосування магнетронних нітридних покриттів в якості декоративних.

Переваги методу магнетронного розпилення:

- можливість нанесення покриттів на термочутливих матеріали при низьких температурах;
- широкий спектр покриттів різного призначення;

До недоліків методу можна віднести наступні фактори:

- відносна складність технічної реалізації методу при отриманні реактивних (керамічних) покриттів;
- відносно висока вартість обладнання;
- низька швидкість осадження.

1.3.3 Метод вакуумно-дугового випаровування

Метод вакуумно-дугового випаровування - випаровування металів сфокусованим електронним пучком з додатковою іонізацією: робоче середовище - вакуум 10^{-3} ... 10^{-2} Па; реакційні газы - N_2 , O_2 , CH_4 ; одержувані покриття - металеві покриття (Ti, Zr, Hf, Cr, Ta, Ni, Co, Si, MCrAlY (M = Ni, Co)), металокерамічні покриття (TiN, ZrN, CrN, TiC, TiCN, ZrCN, TiAlN, AlCrN, TiO₂, ZrO₂); нанокompозити (TiAlN / Si₃N₄, AlCrN / Si₃N₄); алмазоподібні покриття. В установках, де використовується метод дугового випаровування (рисунок 1.6), запалюється електрична дуга, яка переміщається по поверхні мішені і управляється системою магнітів [6, 24, 33]. Мішень встановлена в мідному охолоджуваному катоді, який знаходиться на вертикальній стінці камери, і до нього підводиться негативна напруга. Починається випаровування матеріалу мішені. Однак, при випаровуванні разом з іонами матеріалу також прискорюються неіонізовані частки металу (краплі), які осідають на поверхні деталі. Наявність такої крапельної фази є основним недоліком дугового методу [59, 60]. На дугових установках можна наносити композитні та багат шарові покриття. Для цього використовують різні мішені.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 21 |

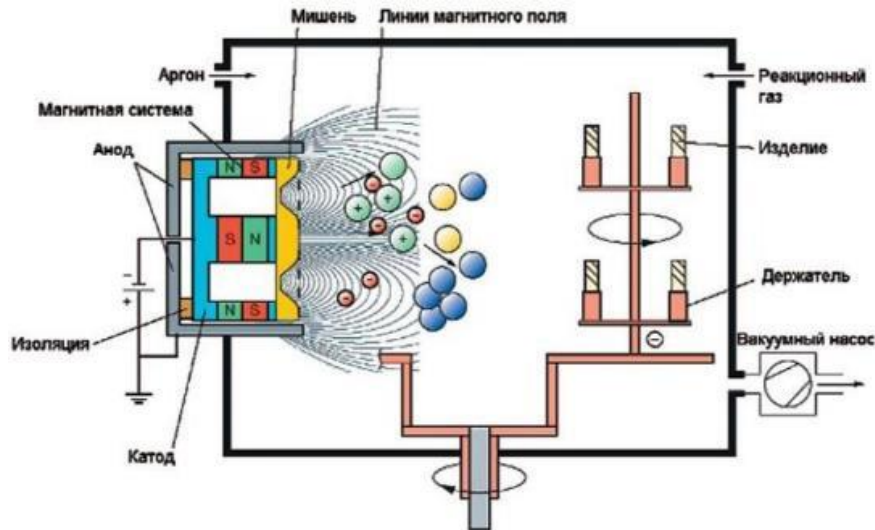


Рисунок 1.6 - Схема установки для нанесения покрытия методом дугового испаривания [6]

Метод вакуумно-дугового испаривання має такі переваги:

- можливість суміщення в одному технологічному циклі процесу нагріву (іонної очистки) поверхні в результаті впливу іонів з процесом нанесення покриття;
- можливість регулювання в широких межах швидкості нанесення покриттів (шляхом зміни, наприклад, струму дуги);
- можливість нанесення складних за хімічним складом покриттів;
- висока адгезійна міцність і суцільність одержуваних покриттів.

Основний недолік методу, як уже зазначалося вище, полягає в наявності в газовому потоці крапельної фази. Мікрокраплі, обложені на поверхні, призводять до неоднорідності покриття, підвищення його шорсткості. Для зниження вмісту крапельної фази часто використовують технологічні прийоми: дегазацію катодів (катоди, отримані методом вакуумної плавки); сепарацію плазмового потоку в електричному або магнітному полях; оптимізацію режимів випаривання. При збільшенні струму дуги підвищується вміст крапельної фази, що несприятливо позначається на

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 22 |

властивостях покриття. Тому рекомендується проводити випаровування при мінімальному струмі дуги. Однак, в цьому випадку знижується швидкість осадження покриття, в зв'язку з чим для отримання високої продуктивності процесу осадження установки комплектуються декількома електродуговими випарниками.

Для зменшення мікрокраплинної фракції в даний час застосовують подачу імпульсного потенціалу зміщення на підкладку [60-63]. Автори роботи [60] крім вищевказаного методу використовують плазмові фільтри (в даній роботі використовується фільтр, розроблений авторами роботи [64]). Нанесення покриттів нітриду титану здійснювалося на установці «Радуга-спектр» при залишковому тиску в камері $2,5 \cdot 10^{-3}$ Па. Частота проходження імпульсів при подачі зміщення на підкладку 100 кГц. Встановлено, що загальна кількість мікрокрапель знижується зі збільшенням потенціалу зміщення, встановленатенденція зменшення розміру мікрокрапель. Утворені мікрочастинки при русі до підкладки можуть соударяючихся з іонами, що може привести до їх іонізації (позитивно заряджені мікрочастинки), крім того, вони також можуть заряджатися негативно за рахунок електронів, що утворюються в плазмі. Конкуренція цих двох процесів безпосередньо впливає на щільність мікрочастинок на підкладці. При високій напрузі зсуву (вище 100-150 В), на думку авторів, енергії іонів може бути досить, щоб невеликі мікрочастинки в результаті зіткнень випарувалися до осадження на підкладку [60].

Важливим напрямком в розробці вакуумних іонно-плазмових покриттів є отримання зносостійких антифрикційних покриттів для пар тертя інтенсивно зношуються деталей в різних галузях машинобудування.

Автори роботи [65] для отримання покриття TiN (товщиною 3-5 мкм) на поверхні вуглецевої і легованої сталі (45-55 HRC) використовували модернізовану вакуумну установку іонно-плазмового напилення «Анга - 1». Мікротвердість отриманого покриття склала 37,10 ГПа.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 23 |

Склерометрическим методом випробувань, запропонованим авторами [65], визначена мінімальне навантаження, яка привела до руйнування покриття ($R_{KP} = 3,5 \text{ Н}$). Для оцінки інтенсивності зношування отриманого покриття використовували метод контактної взаємодії - тертя двох схрещених циліндрів, при якому индентор впроваджують при його обертальному русі в контртіло, твердість якого нижче твердості индентора. За розмірами відбитка на контртіло оцінюють стан поверхні і експлуатаційні характеристики. Отримано, що нанесення покриттів нітриду титану знижує інтенсивність зношування при грубому абразивному зносі ~ на 20%, а при незначному, тонкому абразивному зносі ~ в 10 разів.

Авторами роботи [66] проаналізовано вплив структурного стану вакуумно-дугових покриттів нітриду титану, отриманих в інтервалі тисків азотної атмосфери $(1-67) \cdot 10^{-2} \text{ Па}$ при постійному негативному напрузі зсуву - 230 В, на стійкість до абразивного зносу. Використовувалися методи рентгеноструктурного аналізу та сферичної виїмки. Автори показали, що вплив структурного стану на зносостійкість можна звести лише до залежності від ступеня структурування, так як це багатofакторний процес, і до визначальних факторів належать нанорозмірів зерен-кристаллитов і деформований стан стиснення в покритті.

Автори статті [67] модифікували поверхню тертя сталеві деталі (сталь У10), що входить в пару тертя «голка - підп'ятник», методом нанесення іонно-плазмового покриття TiN. Нанесення покриття здійснювалося на установці ВУ2-МБС при парціальному тиску газу в камері 0,04 Па, напруга зсуву і ток дуги варіювалися по матриці планування ПФЕ 22 (від 120 до 160 В і від 120 до 160 А, відповідно). Методом рентгеноструктурного аналізу (дефрактметр «Дрон-2» із застосуванням Fe-K α - випромінювання методом «ковзного пучка») встановлено, що при всіх режимах нанесення формується покриття з кубічним типом кристалічної решітки. Параметри тонкої структури такі, як розмір блоків мозаїки і щільність дислокацій по межах блоків мають близькі

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 24 |

значення у всіх досліджених режимах і складають 160 нм і 9,2.109 см-2 відповідно. Мікротвердість отриманого покриття склала 19,6 - 26,2 ГПа. Лінійну інтенсивність зношування поверхні тертя деталей оцінювали методом контактної взаємодії на приладі, що імітує роботу пари тертя «Голка - підп'ятник» зі зміни розміру відбитка, попередньо нанесеному на поверхню тертя голки. Застосування іонно-плазмового покриття TiN підвищує зносостійкість деталей в умовах сухого тертя і в умовах змащення VM-1 в середньому ~ в 2 рази і ~ в 10 разів відповідно. Крім того, встановлено, що в залежності від режимів напилення змінюється параметр пластичності іонно-плазмового покриття нітриду титану - зменшення струму дуги і збільшення напруги зсуву призводить до підвищення пластичних властивостей покриття [68].

Авторами робіт [69] проведено експерименти на установці ВУ-2МБС по оптимізації іонно-плазмової технології на зразках зі сталі ХВГ. При парціальному тиску газу в камері 0,04 - 0,06 Па варіювалися напруга зсуву і ток дуги від 120 до 160 В і від 140 до 180 А відповідно. Дослідження дефектності мікроструктури покриттів TiN показали, що зниження струму дуги сприяє формуванню більш якісної мікро- і субструктури. Найбільша кількість крапельної фази Ti і електроерозійних дефектів (9% і 23% відповідно) фіксується в покриттях, отриманих при максимальному значенні струму дуги (180 А). При фрикційних випробуваннях (сухе тертя ковзання «покриття TiN в парі зі сталлю ШХ-15 і сапфіром») отримано значення коефіцієнта тертя $f_{тр} = 0,053-0,059$. Покриття нітриду титану мають знижений електрохімічний потенціал поверхні ~ 90-150 мВ і більше електропозитивний потенціал пітінгообрання в порівнянні з нержавіючими сталями, титановими сплавами і гальванічним покриттям хрому. За рахунок ефекту пасивації вони забезпечують підвищення стійкості сталевих і титанових деталей до виразкової корозії і ефективні для антикорозійного захисту при модернізації компресорних лопаток

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 25 |

стаціонарних газотурбінних двигунів і двигунів морського базування [70].

Авторами роботи [71] проаналізовані структура і фізико-механічні властивості поліфункціональних покриттів нітриду титану, нанесених на зразки з нікелевих і титанових сплавів (ЕП718, ЕП866, ВТ6) методом іонно-плазмового напилення на установці ННВ6.6-И1. В одному технологічному циклі здійснювалися попередня операція іонного очищення за допомогою тліючого розряду в середовищі аргону (тиск в камері $P = 1,2$ Па, напруга на підкладці 500 В, час обробки 5 хвилин) з подальшою низькоенергетичної бомбардуванням іонами азоту (тиск в камері $P = 6,6$ кПа, напруга на підкладці 600 В, струм дуги 110 А, час обробки 1 хвилина) і нанесення покриття нітриду титану (тиск в камері $P = (0,66 - 0,79)$ Па, напруга на підкладці 200 В, струм дуги 110 А, час нанесення 60 хвилин). Методом рентгеноструктурного аналізу (дефрактометр

«Дрон-3М» в симетричній зйомці по Брегг-Брентано із застосуванням Си-К α -випромінювання) встановлено, що фазовий склад покриттів є кубічну фазу TiN , крім того присутні рефлекси Fe і Ti, обумовлені відбиттям від підкладок, так як глибина зондування рентгенівських променів перевищує товщину покриття, яка становить 3 - 5 мкм. Мікроструктура покриттів має сферичну форму зерна розміром 30-

40 мкм. Мікротвердість покриття TiN залежить від підкладки і товщини покриття і знаходиться в діапазоні 10,9 - 20,09 ГПа. На рисунку 1.7 представлено розподіл мікротвердості на косому шлифе зразка зі сплаву ЕП 866. Твердість покриття TiN монотонно знижується від поверхні вглиб. Перехідна зона складається з подслоя титану і демпферного шару складу ($\text{Ti} + \text{TiN}$) і забезпечує плавний перехід від кристалічної структури металу до ґрат нітриду титану. Формування покриття з градієнтним розподілом параметрів мікроструктури і механічних властивостей сприяє підвищенню адгезійної міцності, що є важливим експлуатаційним властивістю захисних покриттів.

Іонно-плазмові покриття нітриду титану дозволяють підвищити

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 26 |

корозійну і ерозійну стійкість поверхні оброблюваної деталі. Прискорені порівняльні корозійні випробування (методом витримки в 10 % -Ому розчині FeCl) показали, що після витримки протягом 24 годин на поверхні покриття TiN, нанесеного на зразки зі сплаву ЕП718 і ЕП866, виявлені окремі точкові питтингов. Найкращу корозійну стійкість показало покриття, нанесене на зразок з титанового сплаву ВТ6. В даному випадку покриття утворює з підкладкою більш пасивну щодо електрохімічної корозії гальванопари з високим потенціалом піттингообразованія.

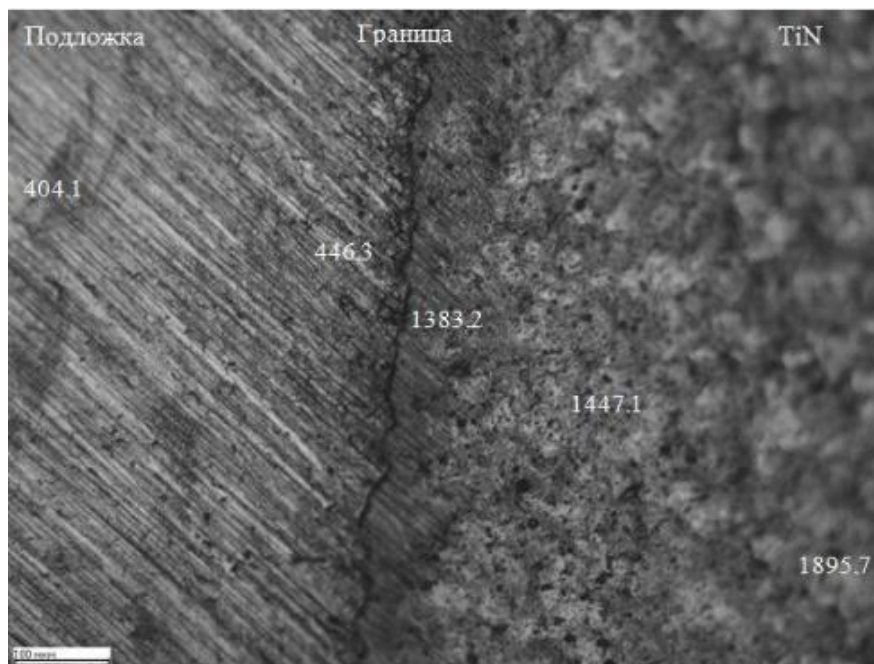


Рисунок 1.7 - Розподіл мікротвердості на косому шлифе зразка зі сплаву ЕП 866 [71]

Авторами робіт [72,73] показано, що іонно-плазмові покриття нітриду титану, отримані методом КІБ, мають комплекс антикорозійних і зносостійких властивостей. Вони перспективні для використання в складі ремонтно-відновлювальних і зміцнюючих технологій з метою підвищення надійності і збільшення терміну служби важливих деталей газотурбінних двигунів - компресорних лопаток. З метою оптимізації режимів іонно-плазмового напilenня в роботах досліджені структура, фізико-механічні властивості TiN, отриманих в широкому інтервалі технологічних параметрів:

| | | | | | | |
|------|------|-----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № док.ум. | Підпис | Дата | | 27 |

струм дуги, опорна напруга, парціальний тиск реакційного газу [74].

Зі зменшенням тиску реакційного газу виявлена тенденція формування аксіальної текстури типу (001). З точки зору антикорозійного захисту, найбільш оптимально нанесення покриття TiN при тиску реакційного газу в камері 0,1 Па. Нанесення покриття в зазначеному режимі на поверхню зразків зі сталі 12х13 сприяло суттєвому підвищенню потенціалу пітінгообразованія і зміщення його в електропозитивний область. Нітрид титану в даному випадку виконує функцію катодного покриття і забезпечує суттєве підвищення корозійної стійкості сталевих поверхонь.

Аналіз огляду наявних літературних даних показав, що при оптимізації режимів іонно-плазмового нанесення стосовно конкретної установки можуть бути отримані поліфункціональні іонно плазмові покриття нітриду титану, які мають комплекс важливих експлуатаційних показників таких, як висока мікротвердість, знижений коефіцієнт тертя, підвищена зносостійкість, корозійна стійкість.

Широке поширення PVD-методів у вітчизняному машинобудуванні обумовлено наступними факторами:

- можливість отримувати рівномірні поверхневі шари в широкому діапазоні товщин з відносно хорошою відтворюваністю властивостей;
- можливість покривати длінноразмерной оброблювані поверхні (магнетронний метод);
- застосовність для широкого кола матеріалів підкладки;
- можливість отримання багатошарових покриттів з шарами різної товщини і з різних матеріалів;
- управління складом, структурою і властивостями шарів шляхом варіювання технологічних параметрів;
- екологічна чистота.

До недоліків цієї групи методів можна віднести:

- необхідність високої кваліфікації обслуговуючого персоналу;

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 28 |

- нижчу продуктивність в порівнянні з CVD-методами;
- необхідність розробки технологічного режиму для конкретного методу отримання покриття і типу обладнання;
- необхідність спеціальної попередньої підготовки поверхонь деталей перед нанесенням покриття.

Показано, що експлуатаційні властивості покриттів визначаються сукупністю технологічних параметрів процесу напилення: опорна напруга, струм дуги, тиск реакційного газу в камері, температура підкладки і швидкість осадження. Грамотне управління процесом іонно плазмового напилення дозволяє прогнозувати режими формування покриттів оптимального складу з заданими експлуатаційними властивостями.

В даний час PVD-технології доступні, так як на ринку активно просуваються варіанти PVD-установок провідних світових компаній, що працюють в області покриттів: Balzers, Cemicon, Metaplas, Leybold, Platit. У Росії знаходять застосування лабораторні установки, здатні виробляти PVD-покриття, що відповідають кращим світовим зразкам, але їх впровадження в практику вітчизняної інструментальної промисловості вельми обмежена. PVD-покриття можуть успішно застосовуватися в машинобудівній галузі для вирішення завдань зміцнення і захисту від корозії інтенсивно зношуються поверхонь деталей верстатів і механізмів, машин і пристроїв, що працюють в контакті з навколишнім або експлуатаційної середовищем.

1.4 іонна імплантація - як метод модифікування поверхневих шарів матеріалу виробу

Ефективним методом модифікації поверхні металів і сплавів є іонно-променева обробка, яка дозволяє цілеспрямовано змінювати структуру, механічні та трибологіческие властивості поверхневих шарів оброблюваного матеріалу, і, як наслідок, підвищувати термін служби різних деталей машинобудування. При іонно-променевої обробки відбуваються різноманітні

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 29 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

структурні зміни в опроміненому матеріалі: освіта точкових радіаційних дефектів, зміни дислокаційної структури; формування напружено-деформованого стану, пов'язаного з протіканням процесів пластичної деформації; зміна хімічного складу тонких поверхневих шарів, утворення хімічних сполук і твердих розчинів; поліморфні перетворення і створення аморфних поверхневих структур.

Іонна імплантація - один з методів модифікації поверхні великого класу матеріалів [76-83]. Метод заснований на впровадженні іонів з високою енергією в поверхневий шар матеріалу. Процес відбувається у вакуумі (10^{-4} - 10^{-3} Па) в іонно-променевих прискорювачах. На рисунку 1.8 представлена характерна схема установки іонної імплантації [84, 85].

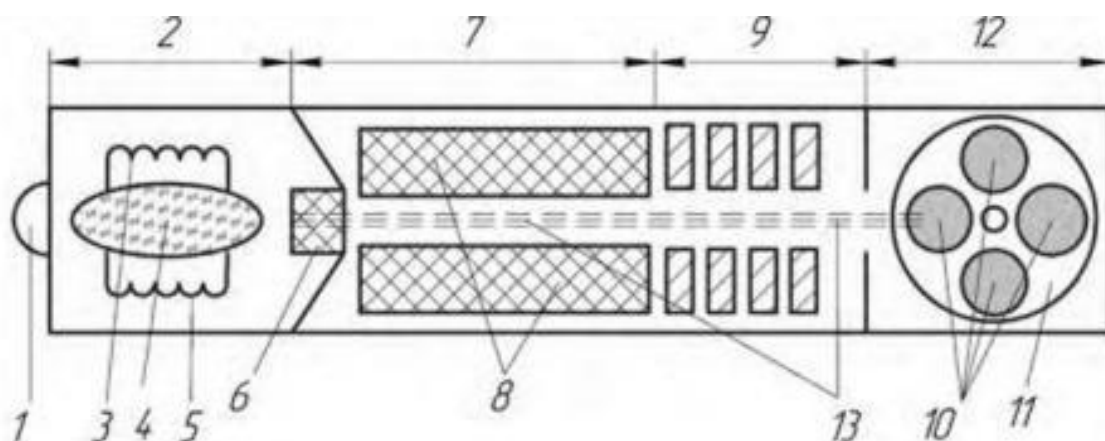


Рисунок 1.8 - Узагальнений вид установки іонної імплантації: 1 - подача робочого газу; 2 - камера «іонний джерело»; 3 - анод; 4 - плазма; 5 - катод; 6 - екстрактор; 7 - частина камери з прискорюють і фокусируючими елементами; 8 - прискорюють магніти, елементи фокусування, фільтр поділу іонів; 9 - частина камери з різними датчиками і аналізаторами; 10 - підкладки; 11 - механізм зміни підкладок; 12 - камера легування; 13 - іонний пучок [85]

В камеру (2) через клапан (1) подається робоча речовина у вигляді газоподібного, рідкого або твердого стану. Потім, під дією сильних

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 30 |

електричних ударів між анодом (3) і катодом (5) виникає розряд в обсязі камери, і іонізуються атоми примесного речовини. Фізичні процеси, що відбуваються всередині камери, призводять до утворення плазми (4). Іони з плазми відсіваються за допомогою різниці потенціалів між екстрактором (6) і плазмою. При подачі негативного потенціалу на екстрактор позитивні іони починають притягуватися до нього, формується початковий іонний потік речовини (13). початковий

«Розкиданий» потік іонів з екстрактора направляється в камеру (7), де розташовані фокусують лінзи, за допомогою яких формується пучок іонів. Там же є прискорюють магніти для додання іонів необхідної енергії, після чого іони фільтруються по масі. Подальший потік іонів проходить через камеру (9), в ній розташовані датчики для контролю проходить маси речовини. Остання камера (12) являє собою відсік, де відбувається основний процес - імплантація. У ній розташований обертовий механізм (11), який змінює підкладки (10).

Основними параметрами технологічного процесу іонного впровадження є енергія прискорених іонів E і доза опромінення D .

Потрапляючи на модифікується матеріал, іони впроваджуються в нього на глибину 5 - 500 нм в залежності від сорту іонів, їх енергії і щільності іонного струму. Умовно виділяють низькоенергетичну іонну імплантацію з енергією іонів 2 - 10 кеВ і високоенергетичну імплантацію з енергією іонів 10 - 400 кеВ. Залежно від конструкції імплантера діаметр плями іонного променя на поверхні оброблюваного матеріалу може становити від 0,01 до 0,2 м, а значення середнього іонного струму: 1 - 20 мА. дози іонного опромінення традиційно знаходяться в інтервалі 10^{14} - 10^{18} см⁻². При взаємодії бомбардують іонів з поверхневими шарами модифікується матеріалу протікає цілий комплекс складних фізичних процесів. Крім імплантації іонів в поверхню матеріалу, одночасно протікають такі процеси, як розпорошення поверхні, розвиток каскадів зіткнень, каскадне (балістична)

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 31 |

перемішування атомів матеріалу в поверхневому шарі, радіаційно-стимульована дифузія, освіту метастабільних фаз, радіаційно-стимульована сегрегація (перерозподіл атомів матеріалу в поверхневому шарі), переважне розпилення, адсорбція Гіббса (зміна складу поверхні за рахунок зменшення вільної енергії), супутній розігрів. [85, 86]. Співвідношення між цими процесами залежить від типу імпантуються іонів,

До основних недоліків методу відносяться:

- можливість обробки поверхонь матеріалів тільки в зоні прямої дії іонного променя;
- мала глибина проникнення іонів в матеріал (особливо при низьких енергіях) в порівнянні з традиційними методами хіміко-термічного зміцнення.

Іонна обробка істотно впливає на мікротвердість облученої поверхні. Зміна H_{\square} відбувається на глибинах від одиниць до декількох сотень мкм, при цьому заряджені частинки проникають в мішень на глибину не більше 0,1 мкм. Цей ефект при іонному опроміненні називають ефектом «Дальнодействия» [87-89]. Зміцнення при іонної імплантації з точки зору процесу пластичного деформування визначається рухом дислокацій, а також їх взаємодією один з одним і іншими дефектами решітки. При іонної обробки формується розвинена дислокаційна структура.

У більшості робіт зміцнення поверхні металів і сплавів досягається імплантацією іонів C^+ , N^+ , B^+ . Так в роботі [90] встановлено збільшення твердості поверхні сталі ШХ15, облученої Z^+ ($E = 40$ кеВ, $D = 1017$ см⁻²) до глибини 300 мкм. В шарі товщиною ~ 100 мкм спостерігається значне зростання мікротвердості (5 ГПа), що на думку авторів, пов'язано з утворенням карбідів Fe. Висока H на великих глибинах пояснюється формуванням гетерогенних шарів між легованим шаром і матрицею.

Автори роботи [71] досліджували імплантацію іонів N^+ , B^+ , C^+ в робочі поверхні деталей машин з сірого чавуну, що дозволило підвищити

| | | | | | | |
|------|------|-----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № док.ум. | Підпис | Дата | | 32 |

мікротвердість в поверхневому шарі глибиною до 50 мкм. Імплантація іонів N +, B +, C + сприяє підвищенню мікротвердості поверхневого шару в ~ 6, 2,5 і 3 рази, відповідно. На думку авторів, це пов'язано з утворенням дрібнодисперсних фаз - нітридів (Fe₃N, Fe₂N), боридів (FeB, Fe₂B) і карбідів (Fe₃C) в тонкому поверхневому шарі. Найбільшу зносостійкість поверхні деталей забезпечує Іонна імплантація N +, що, на думку авторів, може бути пов'язано з формуванням щільного шару на поверхні, який «в якійсь мірі вирівнює гетерогенну структуру чавуну», а так само за рахунок зміцнення поверхневого шару.

В роботі [78] досягнуто збільшення стійкості в ~ 5 і ~ 3 рази вольфрамокарбідових твёрдосплавних пластин, оброблених аргонем (D = 1018 см⁻²) і ренієм (D = 2.1017 см⁻²) відповідно. Показано, що зносостійкість загартованої сталі У8А після іонної імплантації Z +, Si +, Re + лінійно зростає зі збільшенням атомного номера імплантуваного елемента.

В роботі [92] досягнутий ефект зміцнення поверхні деталей тертя зі сталі У10, опромінених C + (E = 80 кеВ, D = (1,2 - 1,4) .1017 см⁻²). Мікротвердість поверхні тертя збільшується на ~ 3 ГПа.

Метод іонно-променевої обробки може бути вельми перспективний для зміцнення поверхонь тертя, підвищення їх зносостійкості і забезпечення довговічності вузлів тертя різних деталей в машинобудівній галузі.

1.5 Наукові тенденції в розробці конструкційних нанокристалічних матеріалів

Останнім часом в науці і техніці представляють інтерес розробки нових металевих і керамічних матеріалів з вираженою нанокристалічною структурою, які знаходять застосування в багатьох областях техніки. Зменшення розміру будь-яких структурних складових матеріалу (розміру зерен, кристалітів) нижче деякої граничної величини (менше 100 нм) призводить до радикальної зміни фізико-механічних властивостей, які в свою чергу визначаються характером

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
| | | | | | МРТМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 33 |

розподілу, формою і хімічним складом нанорозмірних елементів.

Найбільш сильні зміни властивостей наноматеріалів і наночастинок лежать в діапазоні розмірів кристалітів близько 10 - 100 нм. Для наночастинок частка атомів, що знаходяться в тонкому поверхневому шарі (його товщину приймають близько 1 нм), в порівнянні з мезо- і мікрочастинками помітно зростає. Дійсно, частка приповерхневих атомів буде пропорційна відношенню площі поверхні частинки S до її об'єму V . Якщо позначити характерний розмір частки (кристалітів) як D , то [84]:

$$S/V \sim D^2/D^3 \sim 1/D. \quad (1.1)$$

Атоми на поверхні, на відміну від знаходяться в обсязі твердого тіла, задіють не всі зв'язки з сусідніми атомами, що призводить до виникнення в поверхневому шарі сильних спотворень кристалічної решітки, може відбуватися зміна типу решітки.

Також причиною зміни властивостей наноматеріалів є збільшення об'ємної частки кордонів розділу зі зменшенням розміру зерен або кристалітів. Виділяють об'ємну частку наступних складових: кордону розділу, межі зерен і потрійних стиків [84, 93, 94]. Об'ємну частку кордонів розділу оцінюють за формулою:

$$\Delta V_{ГР} = 1 - [(D - s) / D]^3, \quad (1.2)$$

де s - товщина кордонів розділу (близько 1 нм); D - характерний розмір зерна або кристалітів. Об'ємна частка кордонів зерен оцінюється за формулою:

$$\Delta V_{ГЗ} = [3s (D - s)^2] / D^3. \quad (1.3)$$

Об'ємна частка потрійних стиків виходить як різниця:

$$\Delta V_{ТС} = \Delta V_{ГР} - \Delta V_{ГЗ}. \quad (1.4)$$

На рисунку 1.9 наведені криві, розраховані за вказаними формулами, в залежності від відповідних об'ємних часток. Зі зменшенням розміру зерна від 1 мкм до 2 нм об'ємна частка межзеренного компоненти (кордонів розділу)

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 34 |

збільшується від 0,3 до 87,5%. Об'ємні частки межзеренного і внутрізеренної компонент досягають однакового значення $\sim 50\%$ при розмірі зерна ~ 5 нм. Після зменшення розміру зерна менше 10 нм починає сильно зростати частка потрійних стиків. З цим пов'язують аномальне падіння твердості в даному інтервалі розмірів зерна. Показано, що кордони зерен знаходяться в нерівноважному стані, обумовленим присутністю зернограничного дефектів з високою щільністю. Нерівновесність характеризується надмірною енергією кордонів зерен і наявністю далекодействующих пружних напружень. Межі зерен мають кристалографічної впорядковане будова, а джерелами пружних полів виступають зернограничного дислокації і їх комплекси. Нерівновесність кордонів зерен викликає виникнення високих напруг і спотворення кристалічної решітки, зміна міжатомних відстаней і поява значних зсувів атомів, аж до втрати далекого порядку. Результатом є значне підвищення мікротвердості.

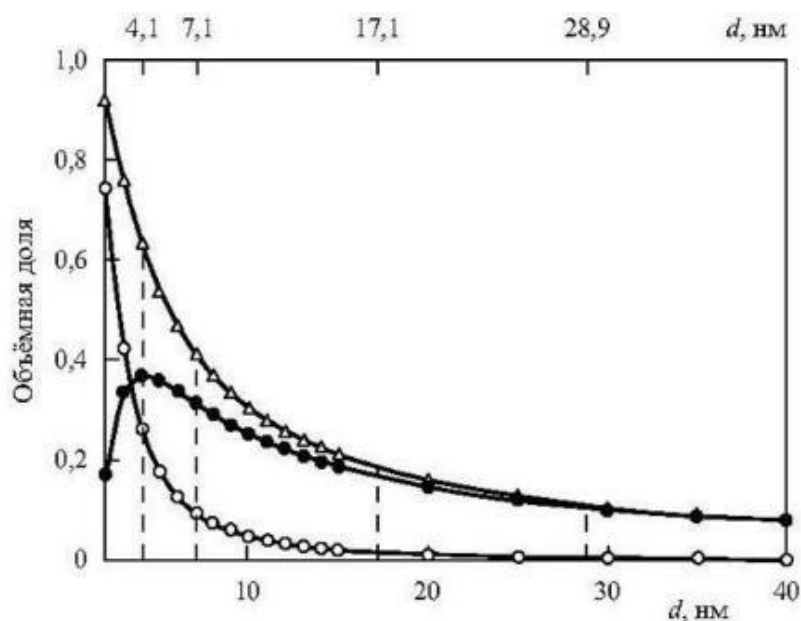


Рисунок 1.9 - Залежність об'ємних часток кордонів розділу, меж зерен і потрійних стиків наноструктурних матеріалів [95]

Формування нанокристалічних структур призводить до значного підвищення механічних характеристик нанокристалічних матеріалів, серед

яких, в першу чергу - висока твердість. Так як твердість характеризує опір матеріалу пластичної деформації при вдавлюванні в нього більш твердого тіла, то існує пропорційна зв'язок між твердістю і межею плинності матеріалу (σ_y) - закон Холла-Петч [84]:

$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y D^n, \quad (1.5)$$

де σ_0 - внутрішнє напруження, що перешкоджає руху дислокації; k_y - коефіцієнт, пов'язаний з проникністю кордону зерна руху дислокацій; D - розмір зерна; величина n змінюється від 1/2 (класичний закон Холла-Петч) до значень, що лежать в інтервалі 1/4 - 1. Вважається, що кожному значенню показника ступеня n відповідає характерний механізм взаємодії дислокацій з межами зерен.

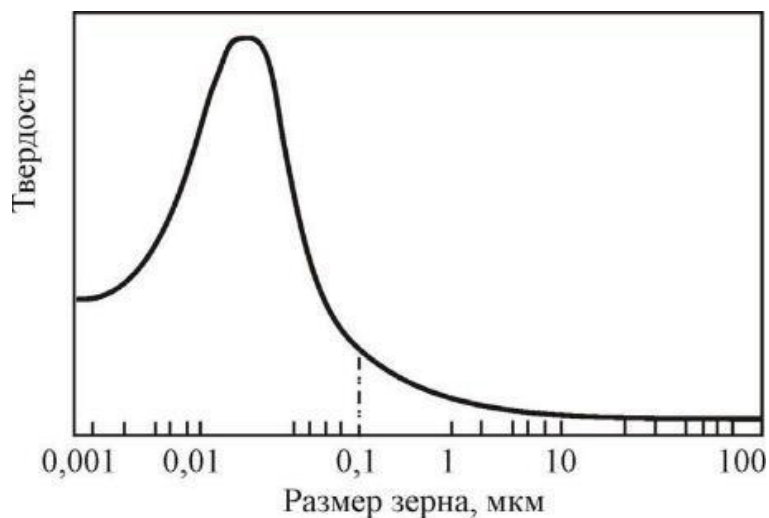


Рисунок 1.10 - Схема зміни твердості при зменшенні розміру зерна [97]

У таблиці 1.1 наведені результати зміни механічних властивостей металів в залежності від розмірів зерна. Міцність нанокристалічних матеріалів при розтягуванні в 1,5 - 2 рази вище, ніж у крупнозернистих аналогів. Для великих зерен зростання міцності і твердості при зменшенні їх розміру пов'язана з запровадженням додаткових кордонів зерен, які є перешкодами для руху дислокацій.

Таблиця 1.1 - Зміна механічних властивостей в залежності від розмірів зерна

| нікель | | | |
|--|--|--------------|--------|
| властивості | Розмір зерна (Звичайний), 10 мкм | нанорозмірів | |
| | | 100 нм | 10 нм |
| Міцність, МПа (25 ° С) | 103 | 690 | > 900 |
| Гранична міцність на розтягнення, МПа (25 ° С) | 403 | 1100 | > 2000 |
| твердість по Вікерсом, кг / мм ² | 140 | 300 | 650 |
| Титановий сплав ВТ8 | | | |
| | 5 мкм | 60 нм | |
| межа міцності, МПа (20 ° С) | 1050 | 1400 | |
| Відносне подовження до руйнування, % | 45 | 53 | |

В даний час вивчається збільшення твердості і міцності сучасних наноматеріалів, зміна пластичності, пружних характеристик, стабільності і інших властивостей. Встановлення відповідних розмірних закономірностей відкриває можливості переходу до нового покоління матеріалів, властивості яких можна регулювати за допомогою розмірів і форми складових їх структурних елементів. Використання сучасних методів поверхневої модифікації і їх комбінування відкриває нові можливості для формування наноструктур в поверхні оброблюваних матеріалів і відкритті нових ефектів, які приведуть до розвитку зміцнюючих технологій для вирішення проблем машинобудування та довговічності відповідальних вузлів тертя.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 37 |

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Об'єкти досліджень

Об'єктами дослідження для пари тертя «піввісь-підшипник» були піввісь з інструментальної сталі ХВГ, Х12Ф1, які працюють в парі з обмежувальним підшипником ковзання з алюмінієво-залізистої бронзи марки типу БрАЖ9-2 з покриттям з припою марки типу ПОС40 (припій олов'яно-свинцевий). Елементний склад інструментальних сталей ХВГ, Х12Ф1 представлений в таблиці 2.1. Сталь ХВГ - інструментальна сталь, за структурою відноситься до заевтектоїдної; структура в загартованому стані - мартенсит, залишковий аустеніт; нетеплостойкая (не береться в роботі нагріву понад 200-2500С). Сталь Х12Ф1 - штампована сталь з підвищеним вмістом хрому, за структурою відноситься до заевтектоїдної; структура в загартованому стані - високолегований мартенсит, карбіди і залишковий аустеніт. Має хорошу теплостійкість і міцність, високу прокаливаемость, закалюваемость і зносостійкість. Висока твердість визначається високим вмістом вуглецю. Сталі з вмістом вуглецю 1,25-1,45% є сталями ледебуритного класу, тобто містять в литому стані карбідну евтектики, мають після гарту твердість HRC 62-64. Ці сталі містять високу кількість карбидоборазуючих елементів. Підвищений вміст вуглецю і хрому забезпечує утворення підвищеної кількості карбідів хрому (M7C3, M23C6). Основним легуючим елементом штампового сталі є хром.

Таблиця 2.1 - Елементний склад сталей ХВГ, Х12Ф1

| Марка сталі | Зміст легуючих елементів, мас% | | | | | | | | | | | |
|-------------|--------------------------------|-----------|----------|---------|---------|---------|---------|--------|---------|--------|---------|------|
| | С | Si | Mn | Ni | S | P | Cr | Mo | W | Cu | V | Fe |
| ХВГ | 0,9-1,05 | 0,1-0,4 | 0,8-1,1 | до 0,35 | до 0,03 | до 0,03 | 0,9-1,2 | до 0,3 | 1,2-1,6 | до 0,3 | --- | ~ 94 |
| Х12Ф1 | 1,25-1,45 | 0,15-0,35 | 0,15-0,4 | до 0,35 | до 0,03 | до 0,03 | 11-12,5 | --- | --- | до 0,3 | 0,7-0,9 | ~ 84 |

Пара тертя працює в середовищі мастильного матеріалу, в якості якого

| | | | | | | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|--|--|--|--|--|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | | | | | | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | | | | | | 38 |

використовується вакуумне масло марки VM-1.

Фото деталей пари тертя «піввісь-підшипник» і робоче креслення піввісь представлені на рисунках 2.1 і 2.2 відповідно.

Вихідні серійні піввісь відповідали вимогам креслення: середня мікротвердість робочої поверхні піввісь $H_{100} = 8,5$ ГПа; шорсткість поверхні (R_a) відповідно до Держстандарту 2789-73 - 11 клас; діаметр піввісь - $(4,929-4,933) \cdot 10^{-3}$ м. Відхилення від циліндричної поверхні в середньому становило $2 \cdot 10^{-3}$ м.



Рисунок 2.1 - Зовнішній вигляд пари тертя «піввісь-підшипник»

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 39 |

проводилася при постійному значенні опорного напруги $U = 140$ В і варіюванні технологічних параметрів: тиск реакційного газу в камері і ток дуги (таблиця 2.1).

Таблиця 2.1-Технологічні режими іонно-плазмового напилення покриття TiN на півосі

| Технологічні параметри напилення | | |
|----------------------------------|---|------------------|
| Опорна напруга U, В | Тиск реакційного газу в робочій камері PN ₂ , Па | Струм дуги ІД, А |
| 140 | 0,04 | 120 |
| | | 140 |
| | | 160 |
| 140 | 0,06 | 120 |
| | | 140 |
| | | 160 |



Рисунок 2.3 - Установа іонно-плазмового напилення ВУ-2МБС

Іонну імплантацію робочих поверхонь голок досліджуваних пар тертя «голка - підп'ятник» проводили на частотно-імпульсному прискорювачі

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 41 |

«Веселка» при енергії іонів $C + E = 80 \text{ кеВ}$ і щільності струму $j = 6 \text{ А / см}^2$ дозами: 1016 см^2 ; $5 \times 1016 \text{ см}^2$; 1017 см^2 ; $5 \times 1017 \text{ см}^2$; 1018 см^2 (рисунок 2.4).



Рисунок 2.4 - Частотно-імпульсний прискорювач «Веселка»

2.3 Вимірювання мікротвердості

Вимірювання мікротвердості проводили на мікротвердомірі ПМТ-3 при вдавненні чотиригранної алмазної піраміди з кутом між гранями 136° в досліджувану поверхню по ГОСТ 9450.

Це представляє собою процес пластичної деформації, на результат вимірювання мікротвердості тонких покриттів впливає підкладка, то отримане експериментальним шляхом значення мікротвердості є твердість композиції «покриття-підкладка».

2.4 Методика визначення характеристик пластичності, одержуваних при вимірюванні мікротвердості

Як характеристики пластичності використовували безрозмірний параметр, запропонований Мільманом Ю.В., що представляє собою частку пластичної деформації в загальній упругопластической деформації під

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 42 |

індентором при мікроіндентірованні на приладі ПМТ-3.

Фізичний сенс параметра полягає в тому, що частка пластичної деформації в загальній деформації матеріалу характеризує здатність цього матеріалу до формозміни. Пластична деформація призводить до релаксації напруг в матеріалі, і чим легше вона протікає в певних умовах деформації, тим більш пластичним є матеріал. Пружна деформація відповідно до закону Гука викликає зростання напруги, в тому числі нормальних, які відповідальні за зародження і розвиток тендітних і квазікрихкого тріщин. Різке зростання величини деформації при навантаженні зразка свідчить про слабку релаксації напружень шляхом пластичної деформації, тобто про низьку пластичність матеріалу.

Таблиця 2.2 -Шкала крихкості

| Середній бал крихкості | характер відбитка |
|------------------------|--|
| 0 | Відбиток без видимих тріщин і відколів. |
| 1 | Одна велика тріщина в кутку відбитка; одна тріщина, не збігається з продовженням діагоналі відбитка. |
| 2 | Дві тріщини в суміжних кутах відбитка. |
| 3 | Дві тріщини в протилежних кутках відбитка; три тріщини в різних кутах відбитка; скол з одного боку відбитка. |
| 4 | Число тріщин більше трьох; скол з двох сторін відбитка. |
| 5 | Повне руйнування форми відбитка. |

Фрикційні властивості досліджували на лабораторній установці тертя. Фотографія установки представлена на рисунку 2.5.



Рисунок 2.5 - Лабораторна установка тертя

Вузол тертя являє собою нерухомий сферичний индентор (сапфір - сфера діаметром $\varnothing = 5,4 \cdot 10^{-3}$ м) і поступально рухається випробуваний зразок. Индентор укріплений на коромислі, що має можливість вільно переміщатися у вертикальній і горизонтальній площинах. У вертикальній площині коромисло врівноважено противагою. Столик зі зразком отримує поступальний рух від електромотора і за рахунок сили тертя впирається в тензодатчик опору. Дотичне зусилля перетворюється тензодатчиком в електричний сигнал, який подається на цифровий реєстратор Ені-701.

Шорсткість поверхні визначали по параметру R_a (середнє арифметичне відхилення профілю) на цифровому профілометри Tester TR 200 по ГОСТ 2789-73.

2.5 Визначення зносостійкості

Випробування зносостійкості для деталі «піввісь» пари тертя «Піввісь-підшипник» проводили на установці «Ехо» при сухому поперечному контакті обертового индентора (сталевий стрижень зі сталі У10) з навантаженням $N = 3$ Н протягом різного часу (рисунок 2.6). Геометричні розміри плями зносу визначали на мікроскопі МБС-9. Величину зносу визначали як середнє значення

| | | | | | | |
|------|------|-----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № док.ум. | Підпис | Дата | | 44 |

з вимірів діаметрів 10-ти плям зносу. Точність вимірювання діаметра плями зносу становила +/- 0,0003 м. Модель контактного зносу представлена на рисунку 2.9. Час переводиться в шлях, пройдений індентором за формулою:

$$L = \pi dn, (m),$$

де: $\pi = 3,14$; d - діаметр індентора; n - кількість обертів індентора.

Величину зносу матеріалу оцінювали по глибині канавки.

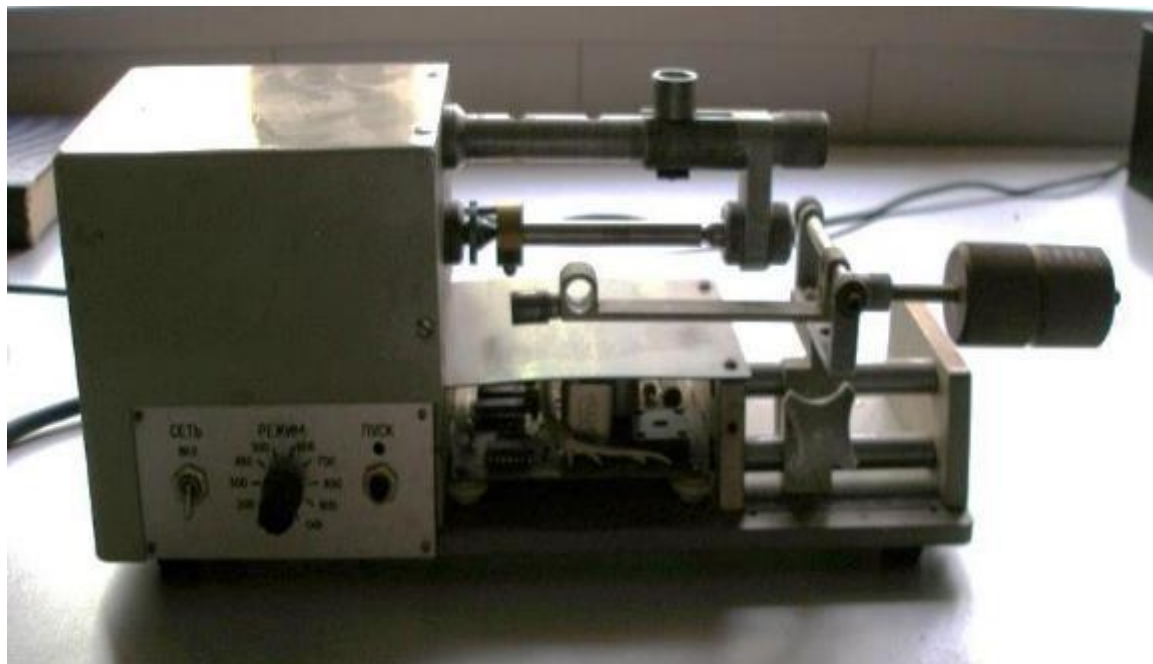


Рисунок 2.6 - Установка зносостійкості «Ехо»

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 45 |

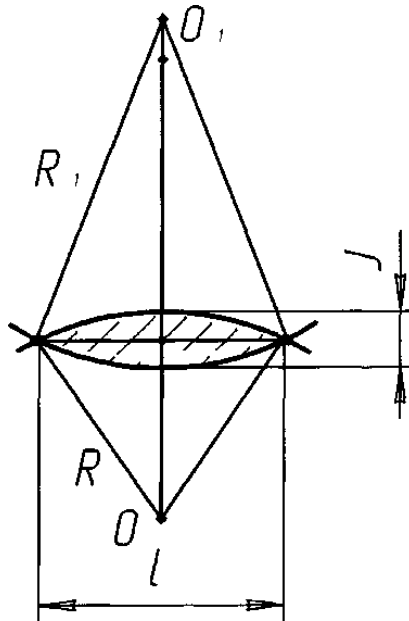


Рисунок 2.9 - Модель контактного зносу

Зносостійкість поверхонь тертя голок в парі з підп'ятниками досліджували на спеціально створеному лабораторному стенді, що імітує реальні умови експлуатації (рисунок 2.10). Швидкість обертання голки навколо своїй осі (в умовах граничного змащення ВМ-1) варіювалася від 10000 об / хв до 35000 об / хв. Величину зносу визначали по зменшенню глибини відбитка індентора (2.2), попередньо нанесеному на голку в зоні поверхні тертя на приладі ПМТ-3. Усереднення результатів проводилося за 10-ти відбитками. Точність вимірювання при цьому становила $\pm 0,3 \cdot 10^{-6}$ м.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 46 |

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

3.1 Підвищення трибологічних властивостей деталі «піввісь» пари тертя «піввісь - підшипник»

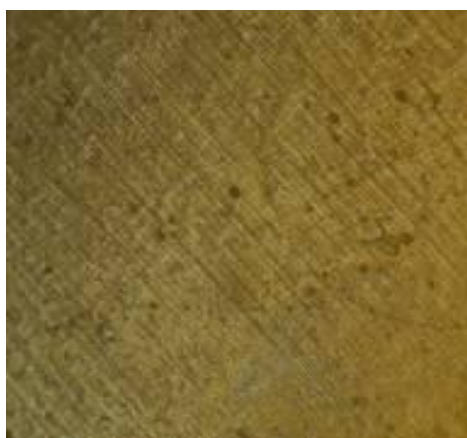
Обмежувальний підшипник ковзання, всередині якого обертається вал ротора центрифуги при радіальних навантаженнях до 50 Н і окружних швидкостях до 11 м / с, служить для обмеження резонансних коливань, що виникають під час його розгону до номінальної швидкості. Ротор центрифуги має обмежувальну потужність електроприводу, проходить резонансну частоту в режимі квазістатичного переходу протягом 5 ... 10 хвилин. При стабільній роботі пара «піввісь-підшипник» має збільшений зазор до такого значення, при якому відсутня механічний контакт до і після резонансу. В процесі взаємодії пари підвищується коефіцієнт тертя через явища адгезійного схоплювання, особливо при дефіциті мастила, якою є гнотовим мастило в центрифугі. В результаті збільшується сила тертя, ризик непрохідний центрифугою резонансної частоти, і не виконується вимога щодо витримуванню багаторазових розгонів. Для підвищення міцності, динаміки і ресурсу в цілому відповідального вузла газової центрифуги, а саме, пари тертя «піввісь-підшипник», запропонований метод поверхневого зміцнення деталі «піввісь» за допомогою іонно-плазмового нанесення покриття нітриду титану. Основним завданням при виконанні роботи була розробка технологічного процесу іонно-плазмового напилення стосовно нових полуосей зі сталі ХВГ (деталь До 4110-05-073) з метою отримання металокерамічного зносостійкого наноструктурованого покриття TiN. Оптимізація технологічного процесу іонно-плазмового напилення проводилася при постійному значенні опорного напруги (U) і варіюванні технологічних параметрів - тиску реакційного газу в камері (P) і струму дуги (I д):

1. U = 140 В, P = 0,04 Па, I_д = 120 А; 2. U = 140 В, P = 0,04 Па, I_д = 140 А;
3. U = 140 В, P = 0,04 Па, I_д = 160 А; 4. U = 140 В, P = 0,06 Па, I_д = 120 А;

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 47 |

5. $U = 140 \text{ В}$, $P = 0,06 \text{ Па}$, $I_d = 140 \text{ А}$; 6. $U = 140 \text{ В}$, $P = 0,06 \text{ Па}$, $I_d = 160 \text{ А}$.

Фотографії мікроструктури поверхні і поперечних шлифовпокриттів, отриманих при різних режимах, представлені на рисунках 3.1-3.4. Покриття - щільне, має низьку поверхневу пористість і малий вміст крапельної фази Ті. З фотографій поперечних шліфів видно, що при всіх режимах напилювання формується покриття зі столбчатою структурою зерен TiN (рисунок 3.3,3.4). Були проведені виміри поперечного розміру (d) стовпчастих зерен для всіх режимів напилення і побудовані залежності d від значень технологічних параметрів (рисунок 3.5). Встановлено тенденція зменшення розміру зерен при зниженні струму дуги і тиску реакційного газу в камері.



а



б



в

Рисунок 3.1 - Оптичні фотографії поверхні покриттів нітриду титану, нанесених на півосі зі сталі ХВГ за різними технологічними режимами ($U = 140 \text{ В}$, $P = 0,04 \text{ Па}$): а - $I_d = 120 \text{ А}$, б - $I_d = 140 \text{ А}$, в - $I_d = 160 \text{ А}$; $\times 200$

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 48 |

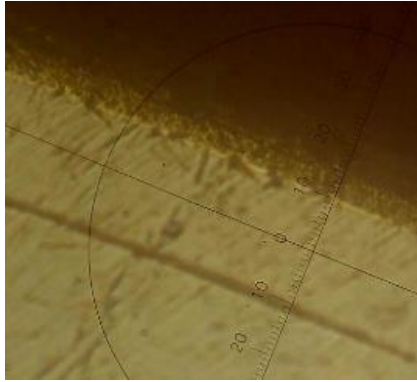
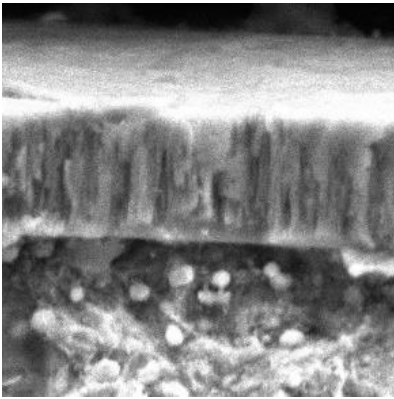
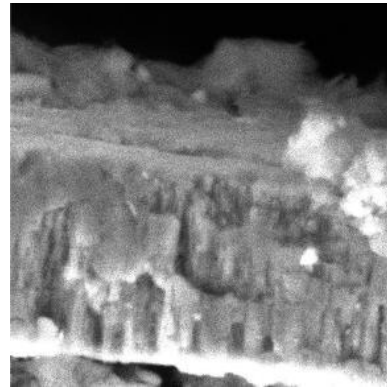


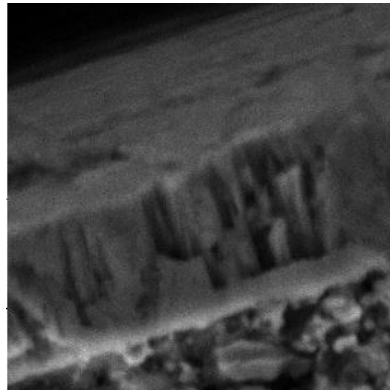
Рисунок 3.2 - Оптична фотографія поперечного перерізу покриття нітриду титану (режим: $U = 140$ В, $P = 0,04$ Па, $I_d = 120$ А); $\times 500$



а



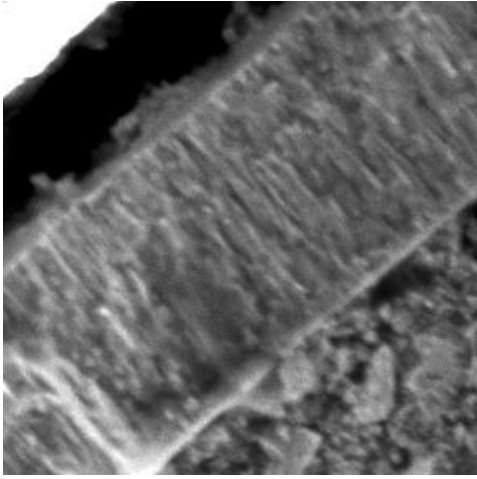
б



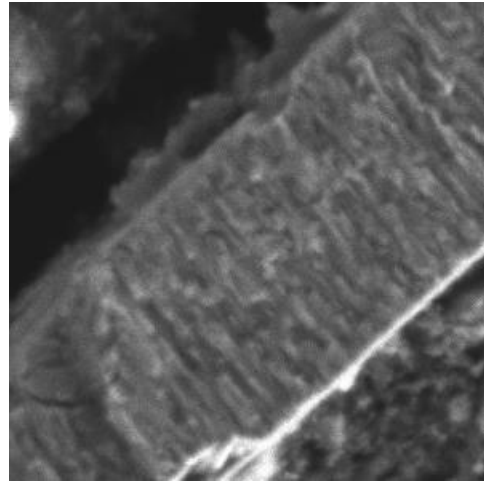
в

Рисунок 3.3 - Морфологія поверхні зламу покриття TiN, нанесеного по технологічним режимам: опорна напруга $U = 140$ В, тиск реакційного газу в камері $P = 0,06$ Па, ток дуги: а - $I_d = 120$ А, б - $I_d = 140$ А, в - $I_d = 160$ А, $\times 10\ 000$

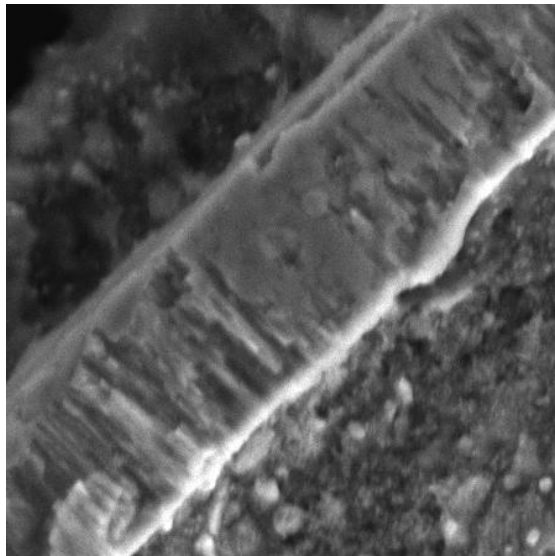
| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 49 |



а



б



в

Рисунок 3.4 - Морфологія поверхні зламу покриття TiN, нанесеного по технологічним режимам: опорна напруга $U = 140$ В, тиск газу в камері $P = 0,04$ Па, ток дуги: а - $I_d = 120$ А, б - $I_d = 140$ А, в - $I_d = 160$ А, $\times 10\ 000$

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 50 |

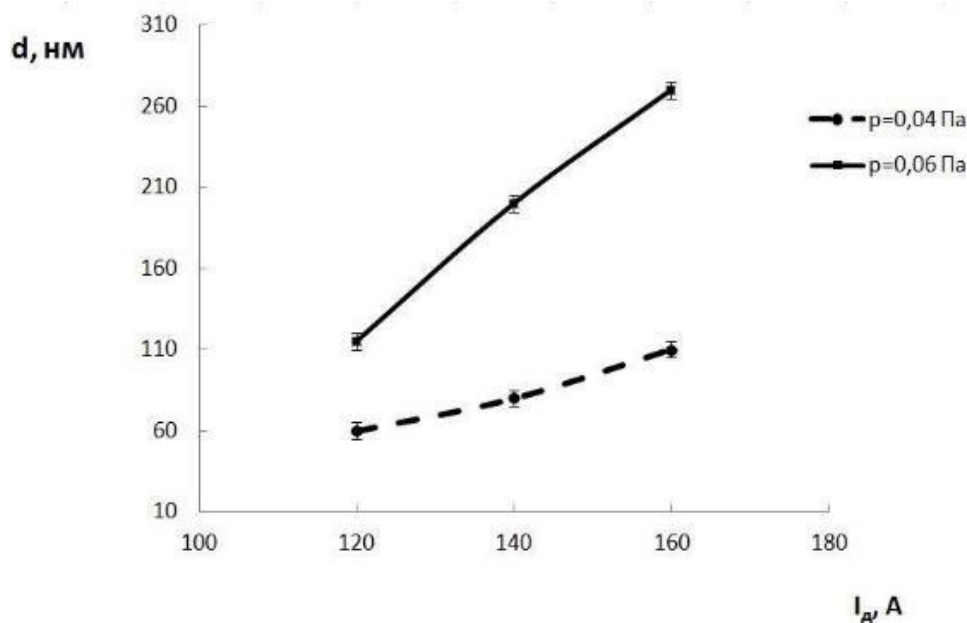


Рисунок 3.5 - Залежності поперечного розміру стовпчастих зерен TiN від струму дуги, отримані при різних парціальних тисках газу у вакуумній камері

З точки зору формування наноструктурованого покриття TiN визначено оптимальний режим напилення: напруга зсуву 140 В, тиск азоту в камері 0,04 Па, ток дуги 120 А, при якому отримано стовпчасті покриття з мінімальним поперечним розміром зерен ~ 60 нм. Товщина сформованих наноструктурованих іонно-плазмових покриттів нітриду титану становить 3-5 мкм (таблиця 3.1).

Таблиця 3.1 Товщина покриттів TiN, отриманих при різних технологічних режимах напилювання

| Технологічні параметри режиму напилення | Парціальний тиск азоту в камері, Па | |
|---|-------------------------------------|----------|
| | P = 0,04 | P = 0,06 |
| | Товщина покриття, мкм | |
| $I_d = 120$ А, U = 140 В | 4 | 3 |
| $I_d = 140$ А, U = 140 В | 3,5 | 3,5 |
| $I_d = 160$ А, U = 140 В | 4 | 3 |

Методом рентгеноструктурного аналізу встановлено, що при всіх досліджених режимах напилювання формується покриття з кубічним типом кристалічної решітки \square -TiN. Крім рефлексів нітриду титану на дифрактограмах присутні лінії \square -Fe від сталевोї підкладки, так як глибина зондування рентгенівських променів перевищує товщину покриття і становить 2-6 мкм (рисунок 3.6).

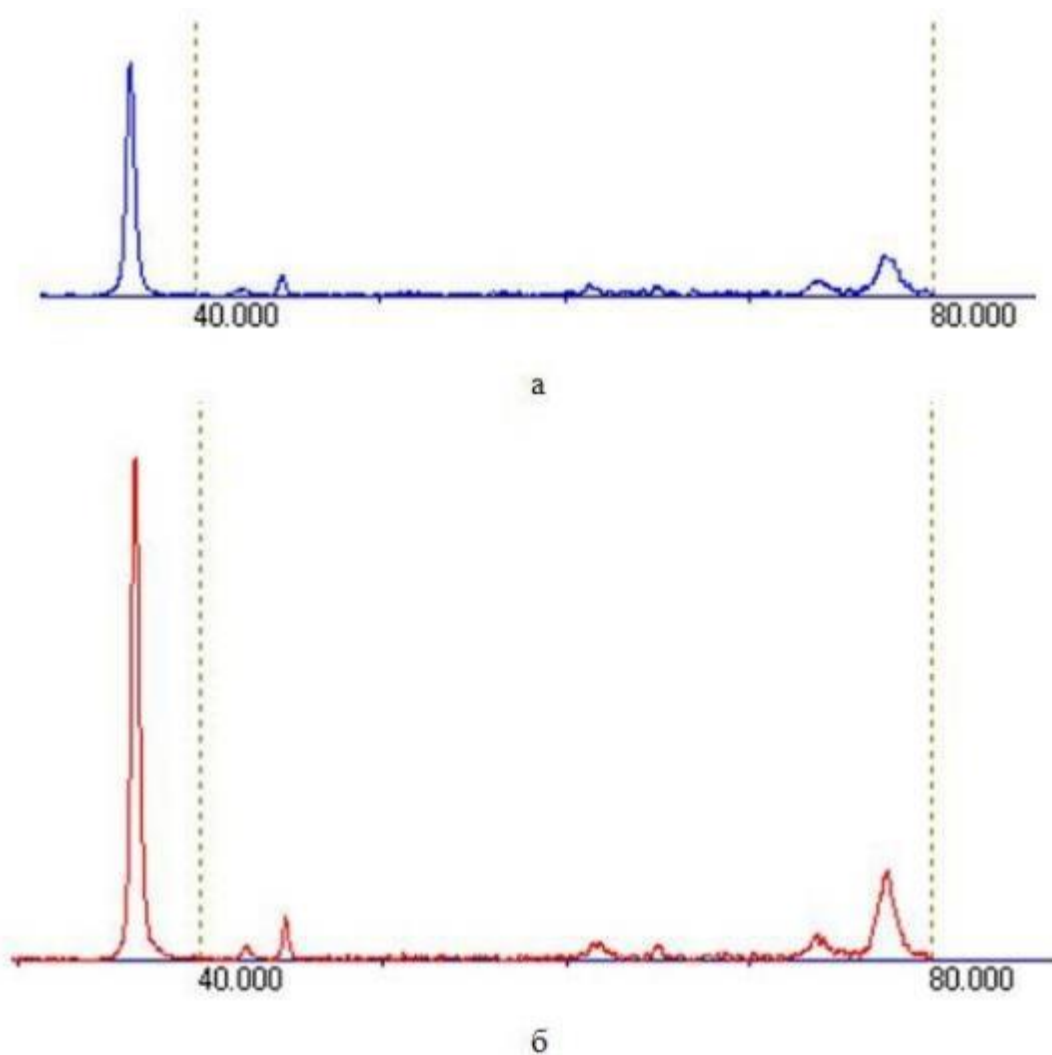


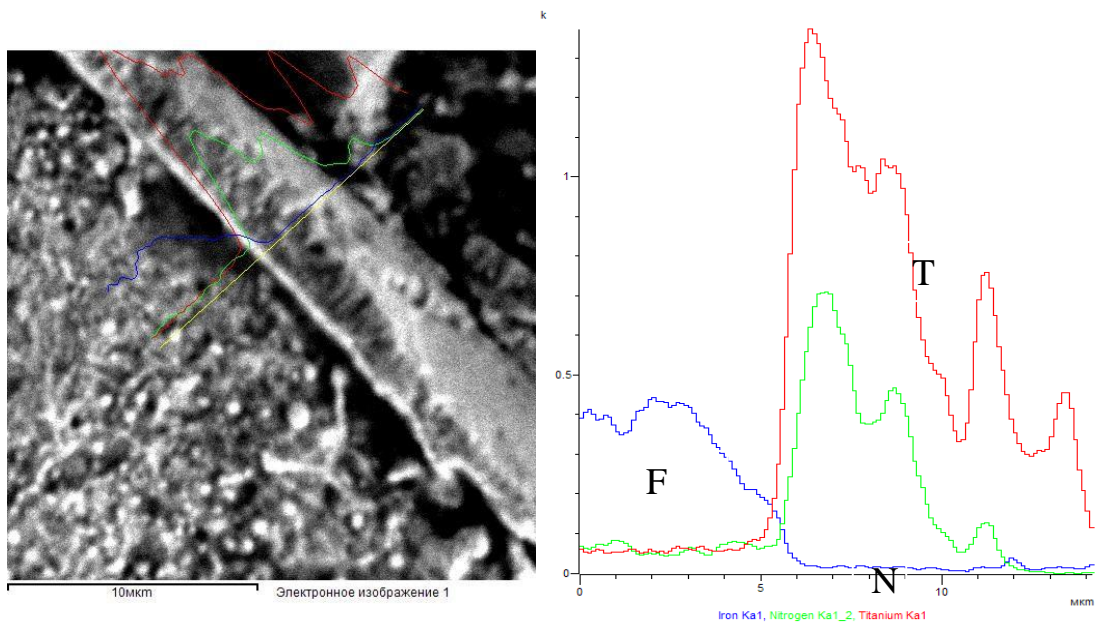
Рисунок 3.6 - Дифрактограми покриттів TiN, отриманих при різних технологічних параметрах іонно-плазмового напилення: а - напруга $U = 140$ В, струм дуги $I_d = 120$ А, парціальний тиск газу в камері $P = 0,04$ Па; б - напруга $U = 140$ В, струм дуги $I_d = 160$ А, парціальний тиск газу в камері $P = 0,06$ Па

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 52 |

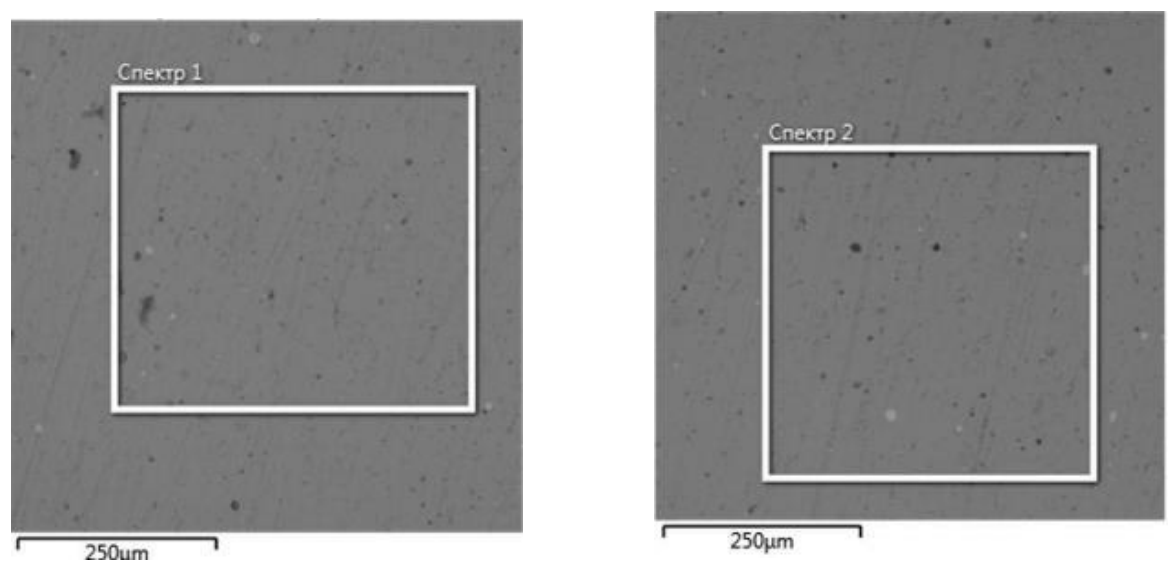
Таблиця 3.2 - Результати рентгенофазового аналізу покриттів TiN, отриманих при різних технологічних параметрах іонно-плазмового напилення

| режим напилення покриття TiN | 2θ , град | d, нм | I, отн.ед. | (Hkl) | фаза |
|---|------------------|--------|------------|-------|---------------|
| U = 140 В I д == 120 A P = 0,04 Па | 36,056 | 0,2495 | 1,00 | 111 | δ -TiN |
| | 41,949 | 0,2153 | 0,05 | 002 | δ -TiN |
| | 44,193 | 0,2050 | 0,09 | 011 | α -Фε |
| | 60,748 | 0,1523 | 0,07 | 022 | δ -TiN |
| | 64,536 | 0,1444 | 0,06 | 002 | α -Фε |
| | 73,094 | 0,1296 | 0,06 | 113 | δ -TiN |
| | 76,742 | 0,1241 | 0,16 | 222 | δ -TiN |
| U = 140 В I д == 160 A P = 0,06 Па | 36,056 | 0,2495 | 1,00 | 111 | δ -TiN |
| | 41,808 | 0,2159 | 0,03 | 002 | δ -TiN |
| | 44,193 | 0,2050 | 0,09 | 011 | α -Фε |
| | 61,029 | 0,1517 | 0,04 | 022 | δ -TiN |
| | 64,396 | 0,1446 | 0,03 | 002 | α -Фε |
| | 73,235 | 0,1293 | 0,05 | 113 | δ -TiN |
| | 76,023 | 0,1237 | 0,19 | 222 | δ -TiN |

На рисунку 3.7 представлено розподіл елементного складу і вміст (мас.%) основних елементів в покритті нітриду титану. Синхронний сплеск рефлексів титану та азоту свідчить про утворення сполуки TiN (рисунок 3.7а). Спектр 1: N - 21,4 мас. %, O - 5,87 мас. %, Ti - 72,72 мас. %; спектр 2: N - 21,14 мас. %, O - 5,30 мас. %, Ti - 70,56 мас. % (Рисунок 3.7б).



а



б

Рисунок 3.7 - Розподіл основних елементів в покритті TiN, отриманому при технологічних параметрах іонно-плазмового напилення - напруга $U = 140$ В, струм дуги $I_d = 120$ А, парціальний тиск газу в камері $P = 0,04$ Па (а); електронне зображення спектрів на поверхні TiN (б)

Вимірювання мікротвердості композицій «сталь ХВГ + покриття TiN», отриманих при парціальних тисках газу $P = 0,04$ Па, $P = 0,06$ Па, від глибини

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 54 |

індентування наведені на рисунках 3.8, 3.9. Встановлено, що зі зменшенням струму дуги формується покриття з більшою мікротвердістю, що обумовлено зменшенням розміру зерен нітриду титану.

Використовуючи експериментальні значення мікротвердості композицій «Покриття TiN + сталь ХВГ», були розраховані значення істинної мікротвердості покриття (для глибини індентування $\sim 1,15$ мкм, де вплив підкладки мінімально) і побудовано залежності мікротвердості покриттів від струму дуги при різних парціальних тисках реакційного газу (рисунок 3.10).

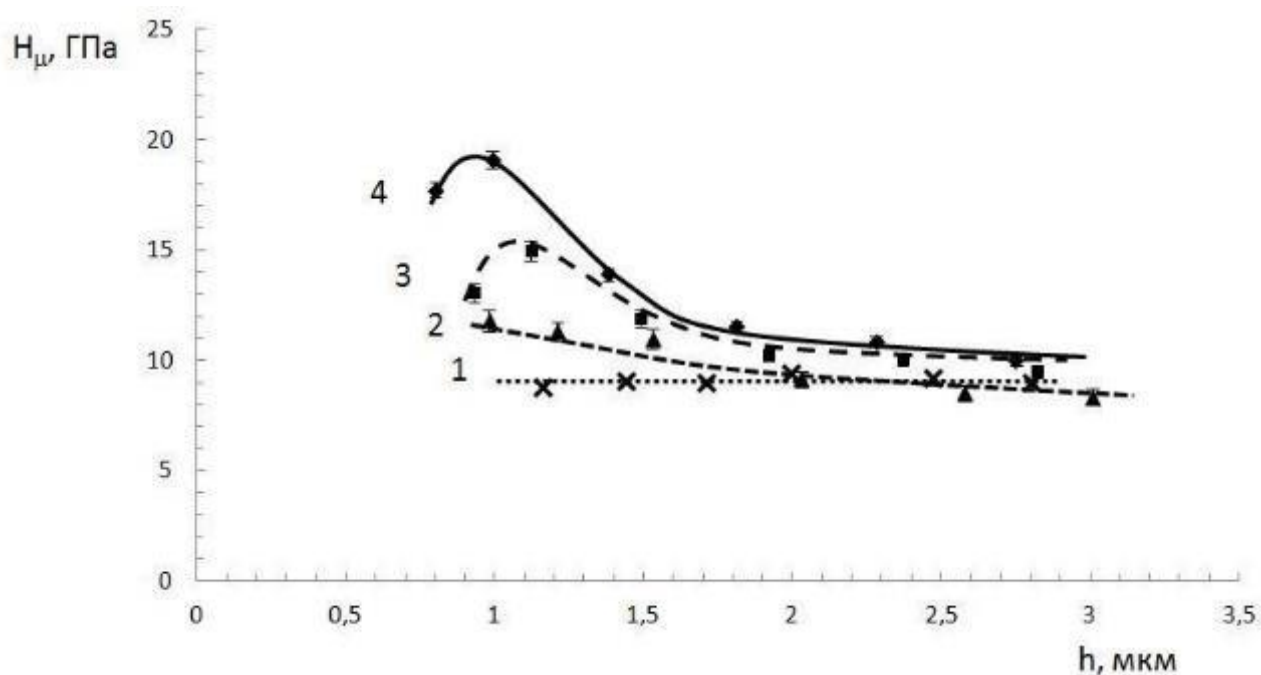


Рисунок 3.8 - Залежності мікротвердості матеріалу підкладки ХВГ (1) і композицій «сталь ХВГ + покриття TiN» від глибини індентування для режимів напilenня: $U = 140$ В, $P = 0,04$ Па, 2 - ІД = 160А, 3 - ІД = 140 А, 4- ІД = 120 А

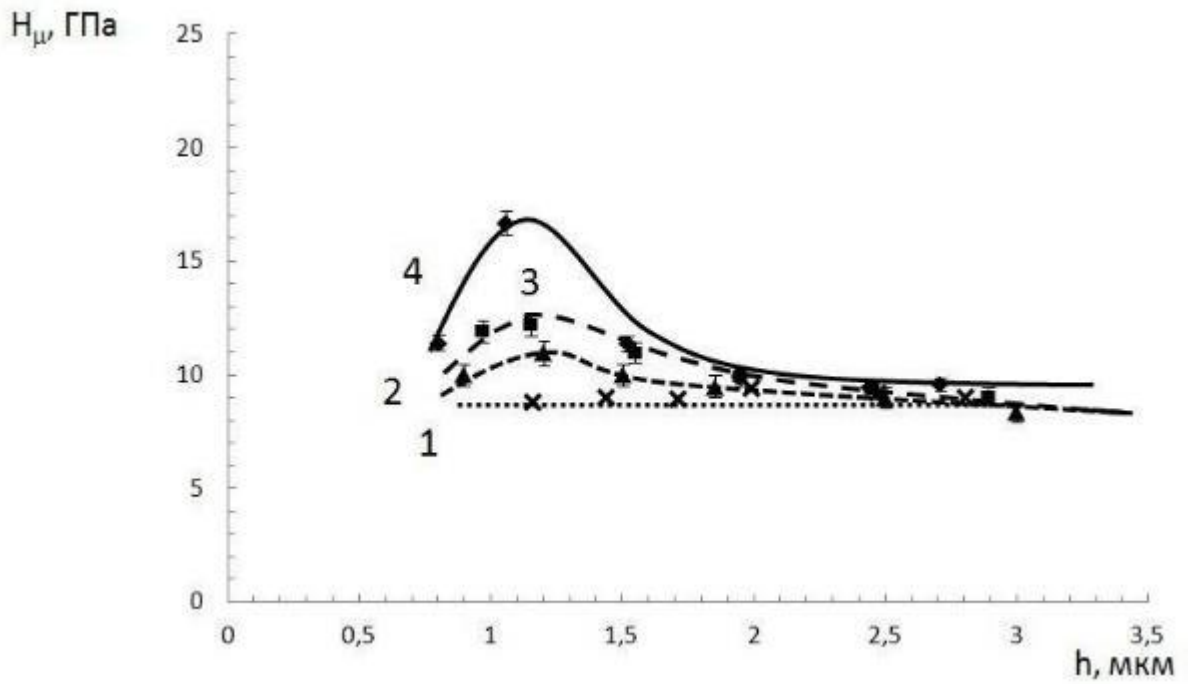


Рисунок 3.9 - Залежності мікротвердості матеріалу підкладки ХВГ (1) і композицій «сталь ХВГ + покриття TiN» від глибини індентування для режимів наплення: U = 140 В, P = 0,06 Па, 2 - ІД = 160А, 3 - ІД = 140 А, 4 - ІД = 120 А

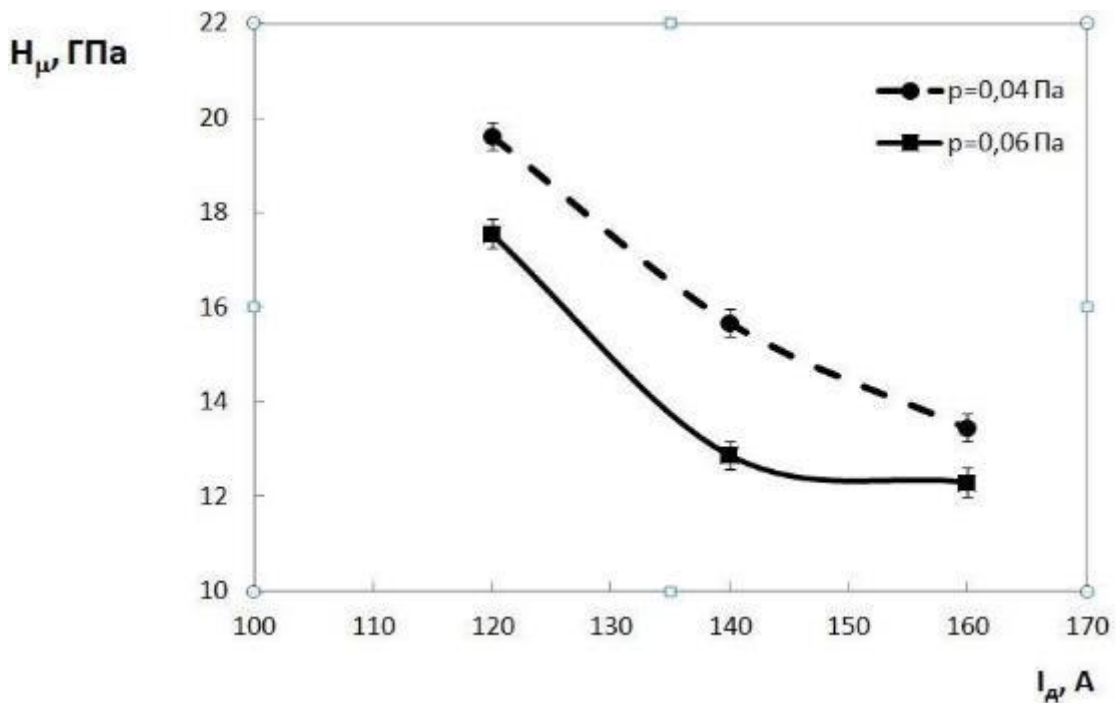


Рисунок 3.10 - Залежності мікротвердості покриттів TiN від струму дуги, отримані при різних парціальних тисках газу в камері

Максимальна мікротвердість H_{\square} встановлена для покриття, отриманого при режимі напилення - напруга зсуву 140 В, тиск парціального газу в камері 0,04 Па, ток дуги 120 А (рисунок 3.10), що обумовлено формуванням найбільш дрібнодисперсного мікроструктури, і як наслідок, межзеренного механізмом зміцнення. Збільшення струму дуги і тиску газу в камері призводить до зниження мікротвердості формується покриття. Таким чином, змінюючи технологічні параметри іонно-плазмового напилення, можна одержувати покриття в широкому інтервалі твердостей і управляти його фізико-механічними властивостями.

Шорсткість покриттів нітриду титану, отриманих при різних режимах напилювання, відповідає 10-11-ому класу, що задовольняє вимогам креслення на даний вид деталей (таблиця 3.3).

Таблиця 3.3 - Шорсткість поверхні покриття TiN, напилених на півосі зі сталі ХВГ при різних технологічних параметрах

| Технологічні параметри напилення покриттів TiN | | Ra, Мкм | клас шорсткості |
|--|--------|---------|-----------------|
| P, Па; U, В | I д, А | | |
| 0,04; 140 | 120 | 0,051 | 11б |
| | 140 | 0,075 | 11а |
| | 160 | 0,093 | 10в |
| 0,06; 140 | 120 | 0,065 | 11а |
| | 140 | 0,094 | 10в |
| | 160 | 0,117 | 10б |
| Штатна піввісь зі сталі ХВГ | | 0,050 | 11б |

Дослідження фрикційних властивостей покриттів нітриду титану, отриманих при тисках $P = 0,04$ Па, $P = 0,06$ Па, та основного матеріалу піввісь (сталь ХВГ) проводили при сухому ковзанні індентора з сапфіра при навантаженнях 0,5 - 2 Н. Даний тип індентора був обраний при оптимізації

антифрикційних властивостей зносостійкого покриття з критерію прямий пари тертя, для якої твердість контртіла повинна перевищувати твердість досліджуваної поверхні для пластичного пропахівання і формування доріжки тертя. Як показали проведені випробування, коефіцієнти тертя контактних пар «Al₂O₃ - TiN» і «Al₂O₃ - ХВГ» знаходяться в інтервалах (0,03 - 0,05) і (0,05 - 0,06), відповідно, в досліджуваному діапазоні навантажень на индентор.

На рисунку 3.11 наведені залежності відносної зміни коефіцієнта тертя покриття TiN при навантаженні на сапфіровий индентор 1 Н від струму дуги при різних парціальних тисках реакційного газу в камері.

Встановлено, що нанесення покриттів нітриду титану на робочу частину піввісь при всіх досліджуваних режимах напилювання призводить до зменшення коефіцієнта тертя (рисунок 3.11). Найменше значення коефіцієнта тертя контактної пари «Al₂O₃ - TiN» зареєстровано на півосях, де покриття отримано при оптимальному режимі напилення (напруга зсуву 140 В, тиск азоту в камері 0,04 Па, ток дуги 120 А), що володіє найбільшою дрібнодисперсною мікроструктурою - 60 нм (рисунок 3.4, 3.5). Нанесення покриття TiN з даного режиму призводить до зменшення коефіцієнта тертя робочої поверхні вихідної піввісь в ~ 1,4 рази.

Слід зазначити, що тертя - складне явище, залежне від фізико-механічних і хімічних властивостей тіл, що труться. Згідно молекулярно деформационної моделі [118, 119] коефіцієнт тертя - сума молекулярної і деформаційної складових:

$$f = f_m + f_D \quad (3.1)$$

Він складається з опору, обумовленого деформацією тонкого поверхневого шару упровалилися мікронерівностями і опору, що виникає внаслідок міжмолекулярних взаємодій в досить зближених ділянках твердих тіл. В умовах пластичного контакту, коли деформационної складової можна знехтувати, коефіцієнт тертя:

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 58 |

$$f = \frac{\tau_c}{H}, \quad (3.2)$$

де τ_c - середня напруга на зріз, H - твердість менш твердого матеріалу пари тертя. Отже, доцільні, два основні шляхи зниження коефіцієнта тертя і підвищення зносостійкості матеріалу - збільшення твердості труться, і зниження міцності адгезійного зв'язку між контактуючими тілами

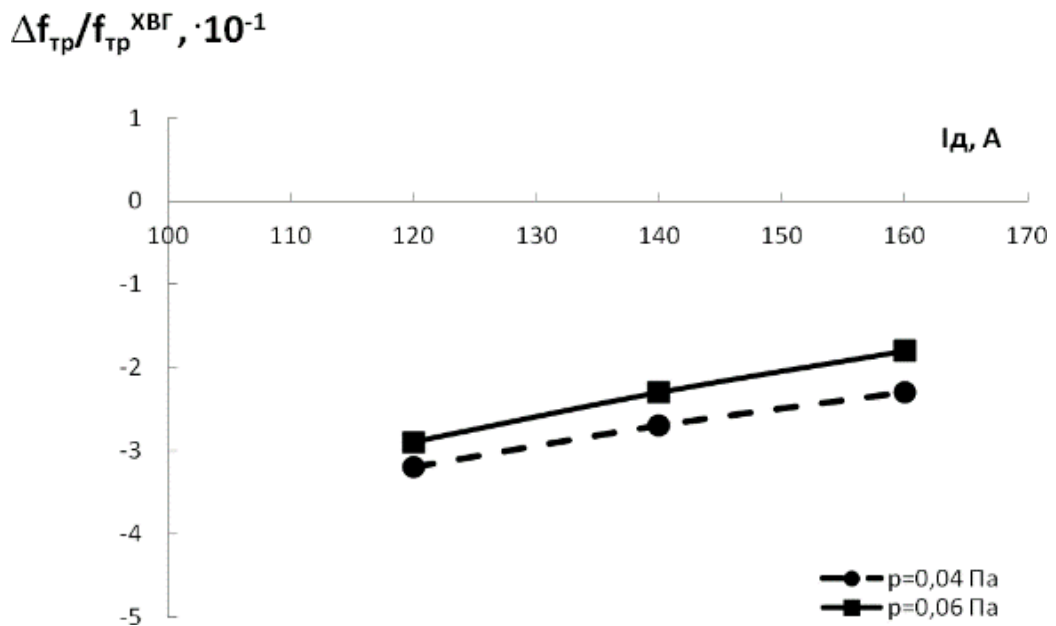


Рисунок 3.11 - Залежності відносного зміни коефіцієнтів тертя покриттів TiN від струму дуги при різних парціальних тисках газу в камері

В умовах ненасиченого пластичного контакту коефіцієнт тертя для сухого ковзання одиничного кульового індентора по площині може бути виражений як:

$$f = \frac{\tau_c}{HB} + \frac{0,31}{R} \sqrt{\frac{N}{HB}}, \quad (3.3)$$

де τ_c - середня напруга на зріз, HB - твердість по Бринелю (~ дорівнює твердості по Віккерсу), N - навантаження на індентор, R - радіус кульового індентора. Розрахувавши відповідно до (3.3) деформаційних складову коефіцієнта тертя f_D і використовуючи значення коефіцієнта тертя f ,

отримане з експерименту, можна визначити молекулярну складову f_m :

$$f_m = f - f_D \quad (3.4)$$

Формула застосовна для зразків з високим класом шорсткості (вище 10-ого), коли шорсткістю площині можна знехтувати і враховувати при розрахунку тільки параметри кульового індентора, який моделюється як одинична нерівність.

Експериментальні значення коефіцієнта тертя f , а також f_m , f_D , σ_c , розраховані за формулами (3.2), (3.3), (3.4) для покриття TiN (отриманого з оптимального режиму: $U = 140$ В, $I_d = 120$ А, $P = 0,04$ Па) зі столбчатою мікроструктурою зерен, переважної орієнтацією кристалографічних площин (111) та покриттів TiN з Круглозернистий структурою, отриманих (по режиму: $U = 160$ В, $I_d = 180$ А, $P = 0,06$ Па), переважною орієнтацією кристалографічних площин (011), наведені в таблиці 3.4. Кількісні оцінки показали, що в столбчатом покритті напруга на зріз істотно менше в порівнянні з круглозеренним покриттям. Це обумовлено тим, що в ГЦК-решітці щільноупакована площині типу (111) є площинами переважного ковзання, для яких знижений напруга на зріз при терті. Поряд з підвищеною твердістю зменшення σ_c сприяє зниженню втрат на тертя.

Таблиця 3.4 - Значення коефіцієнта тертя, молекулярної, деформаційної складових і середньої напруги на зріз для стовпчастих і круглозеренних покриттів нітриду титану

| покриття TiN | Твердість HV, ГПа | f | f_m | f_D | τ |
|----------------|----------------------|-------|--------|--------|--------|
| стовпчасті | 19,13 | 0,040 | 0,0392 | 0,0008 | 0,765 |
| круглозеренное | 18,81 | 0,058 | 0,0572 | 0,0008 | 1,090 |

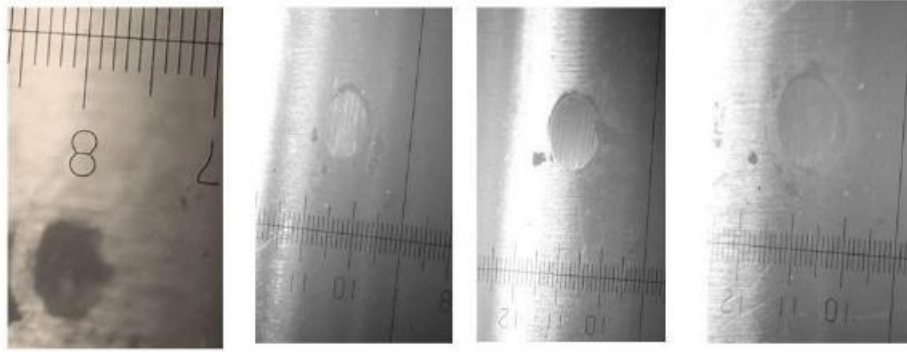
Оскільки піввісь з інструментальної сталі ХВГ працює в парі з

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 60 |

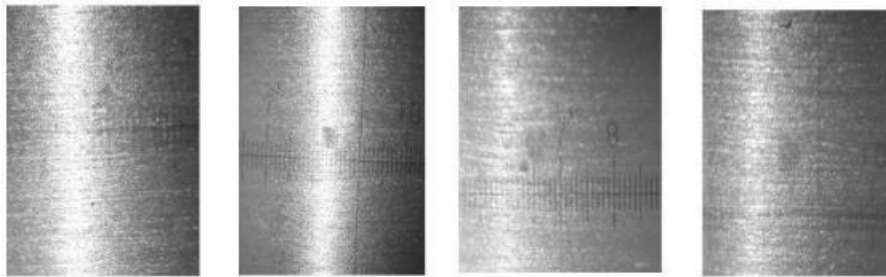
обмежувальним підшипником з алюмінієво-залізистої бронзи марки типу БрАЖ9-4 (з покриттям з припою марки типу ПОС40), то випробування на зносостійкість проводили при сухому поперечному контакті обертового сталевго стрижня (сталь У10) діаметром ~ 8 мм. Сталевий стрижень впливав на нерухому, поперек встановлену штатну піввісь і піввісь з покриттям TiN з навантаженням $N = 3 \text{ Н}$ при різних часах випробувань: 7, 15, 30, 45 хвилин.

Фотографії плям зносу, отримані протягом різного часу, на сталі ХВГ і покриття нітриду титану, напиленого при оптимальному режимі (напруга зсуву 140 В, тиск газу в камері 0,04 Па, ток дуги 120 А) наведено на рисунку 3.12. Слід зазначити, що глибина плям зносу для всіх досліджуваних режимів нанесення не перевищувала товщину покриття. Величина зносу підкладки (сталь ХВГ) і покриттів TiN, отриманих при тисках реакційного газу $P = 0,04 \text{ Па}$, $P = 0,06 \text{ Па}$ від часу випробувань наведені на рисунках 3.13, 3.14. Нанесення покриття TiN по режимам з таблиці 2.1 призводить до збільшення зносостійкості робочої поверхні піввісь. Напилення покриття по оптимальному режиму сприяє зменшенню величини зносу робочої поверхні в ~ 4 рази.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 61 |



основной материал – сталь ХВГ



покрытие нитрида титана

Рисунок 3.12 - Фотографії плям зносу, отримані на установці зносостійкості «Ехо», протягом різного часу випробувань на сталі ХВГ і на покритті нітриду титану, нанесеного при оптимальному режимі, опт.

x20

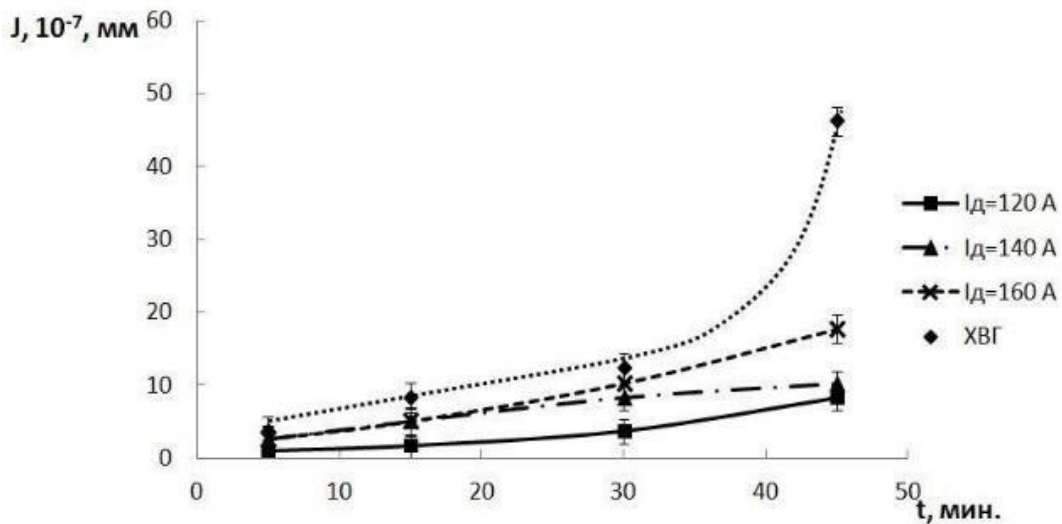


Рисунок 3.13 - Залежності величини зносу від часу випробувань для матеріалу підкладки зі сталі ХВГ і покриттів TiN, отриманих при $U_{см} = 140 \text{ В}$, $P = 0,06 \text{ Па}$ і різних значень струму дуги

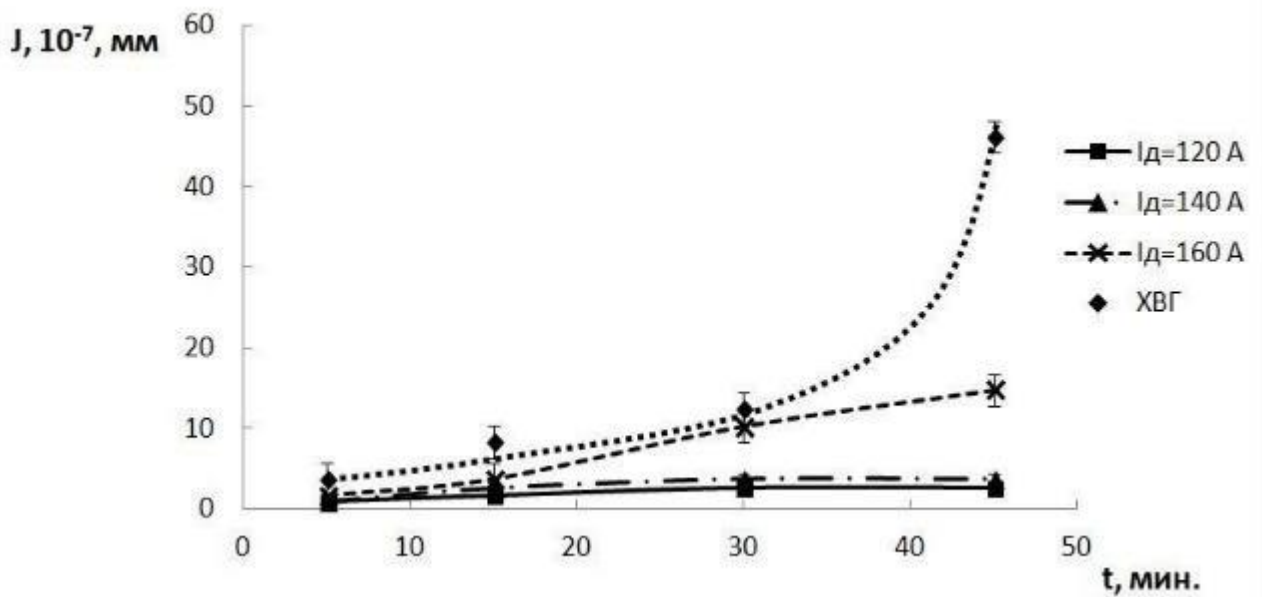


Рисунок 3.14 - Залежності величини зносу від часу випробувань для матеріалу підкладки зі сталі ХВГ і покриттів TiN, отриманих при $U_{см} = 140$ В, $P = 0,04$ Па і різних значень струму дуги

З технічної документації відомо, що вал ротора центрифуги проходить резонансну частоту в режимі квазістатичного переходу протягом перших 5-10 хвилин після запуску. На рисунку 3.15 наведені залежності відносної зміни величини зносу покриттів від струму дуги при часу випробування 7 хвилин і при різних парціальних тисках реакційного газу в камері. Видно, що найменшим зносом мають покриття нітриду титану, отримані при струмі дуги 120 А.

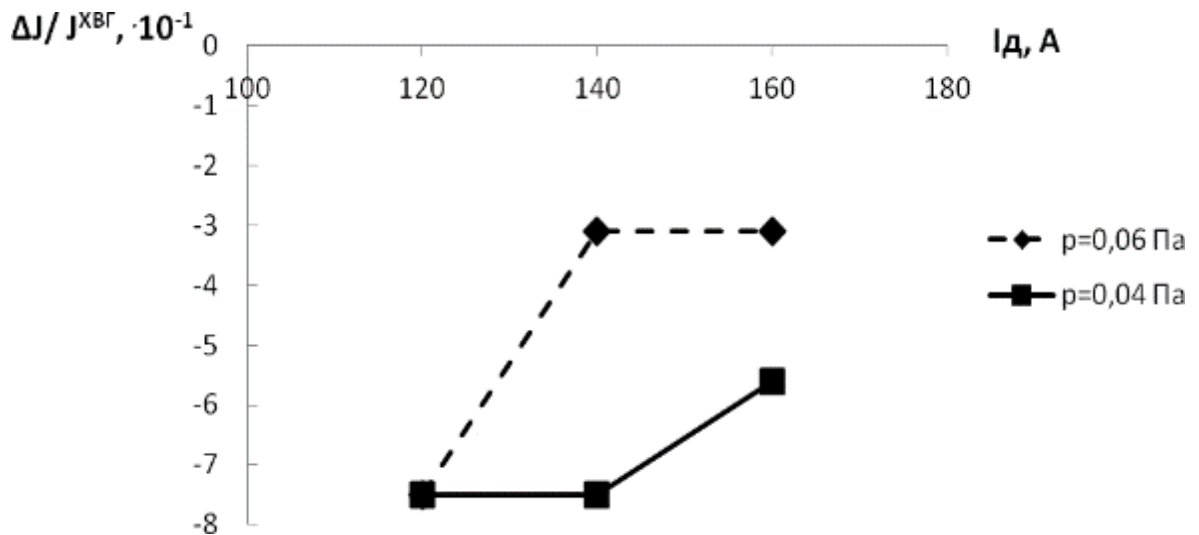


Рисунок 3.15 - Залежності відносної зміни величини зносу від струму дуги при часу випробування 7 хвилин

Тверді покриття, як правило, мають підвищену крихкість і схильні до відшаровування, що досить просто зареєструвати методом склерометри. Скретч-тести дозволяють досліджувати і реєструвати різні типи руйнувань і класифікувати покриття відповідно до отриманих результатів.

На рисунках нижче представлені результати склерометричних випробувань, панорами подряпин по всій довжині, фотографії подряпин, отриманих при різних навантаженнях на индентор для всіх досліджуваних покриттів нітриду титану.

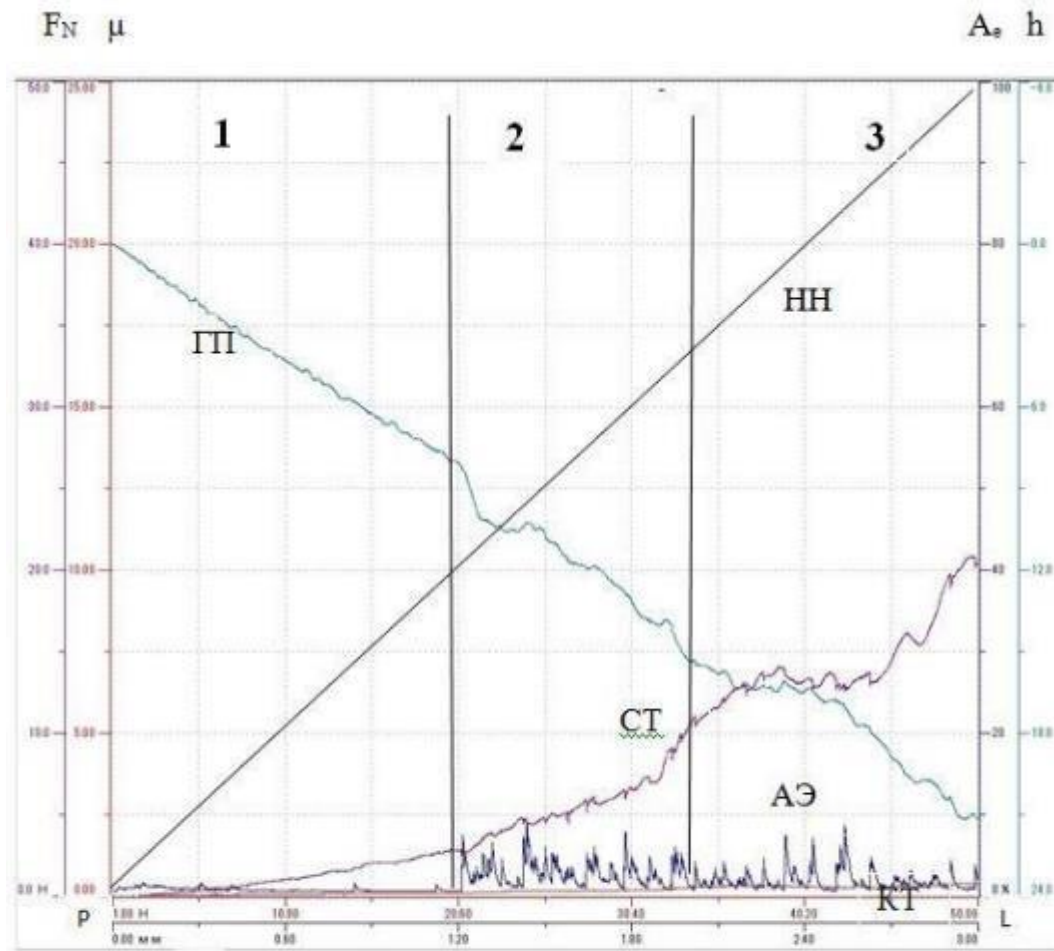


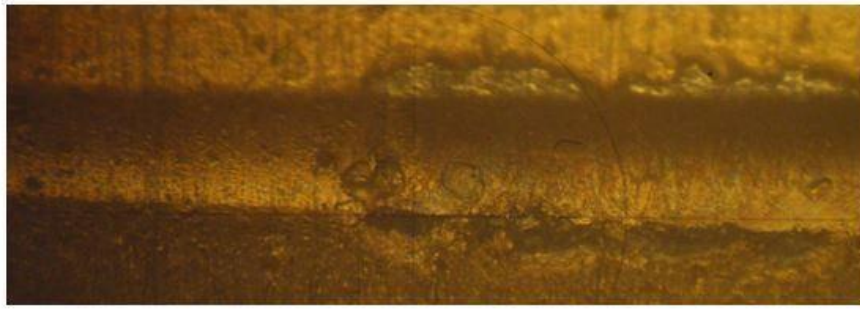
Рисунок 3.16 - Зміна сигналів різних датчиків при дряпанні композиції «TiN ($P = 0,04$ Па, $ID = 160$ А) - сталь ХВГ» при наростаючому навантаженні: ПН - величина нормального навантаження (P); ДП - глибина проникнення індентора (h); СТ значення сили тертя (FN); АЕ - амплітуда сигналу акустичної емісії (Ae); КТ - значення коефіцієнта тертя (μ)

| | | | | |
|------|------|----------|--------|------|
| | | | | |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |

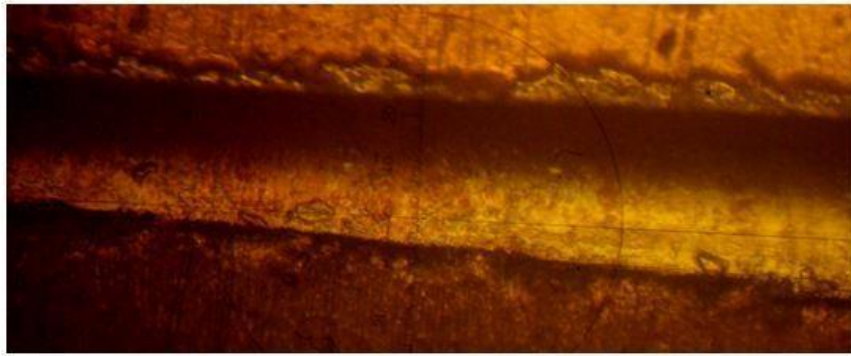
МРТАМ 21.16115.000. ПЗ

Арк.

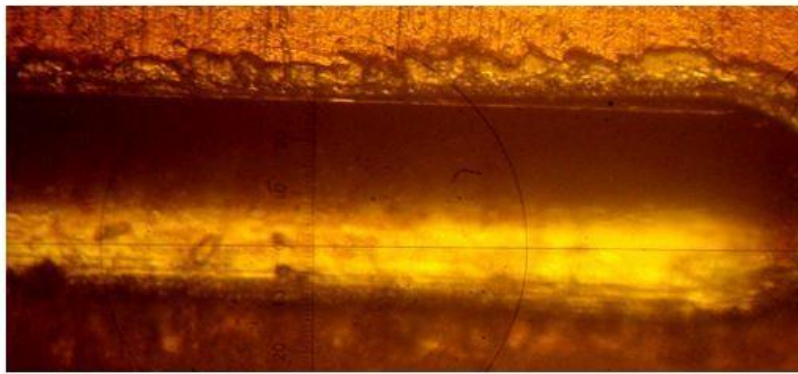
65



а



б



в

Рисунок 3.17 - Фотографії подряпин на покритті TiN ($P = 0,04$ Па, ІД = 160 А) при наростаючій навантаженні на індентор в діапазонах: а - 15-25 Н; б - 25-40 Н; в - 40-50 Н

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 66 |

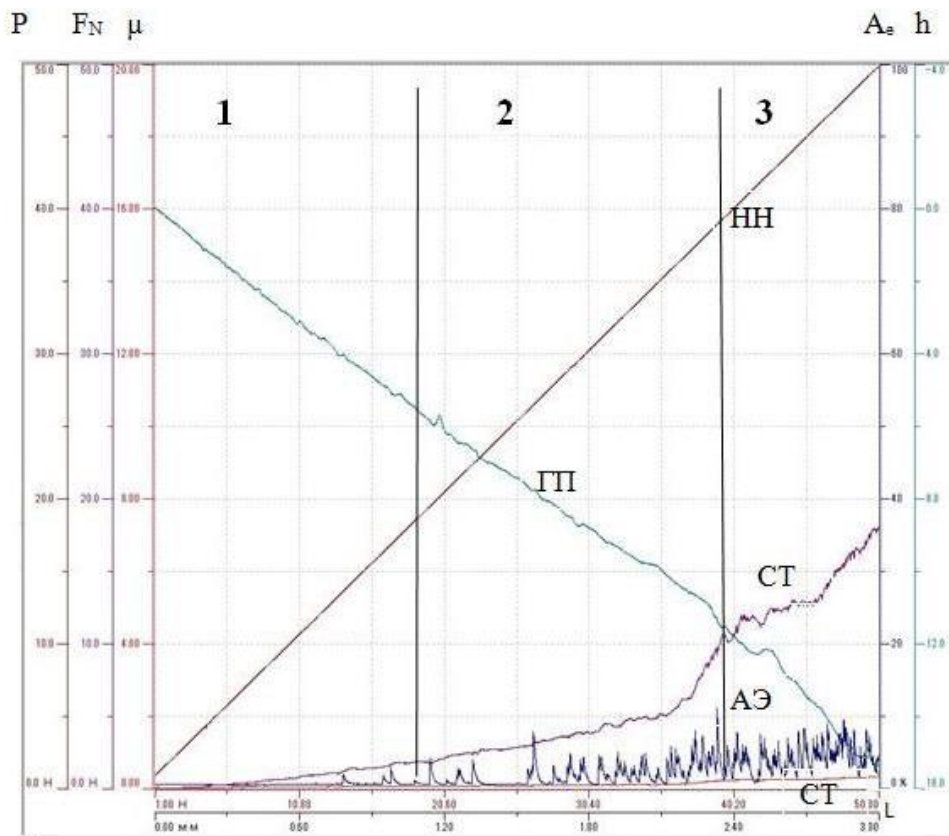
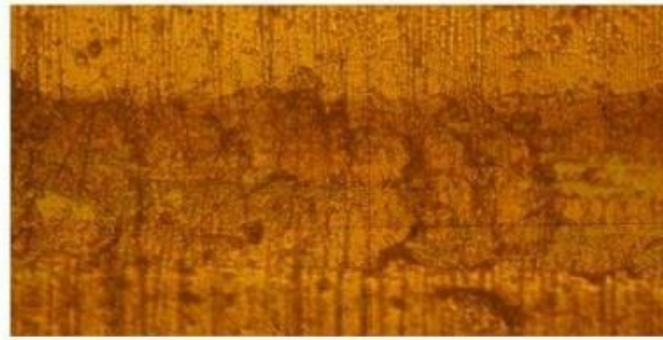
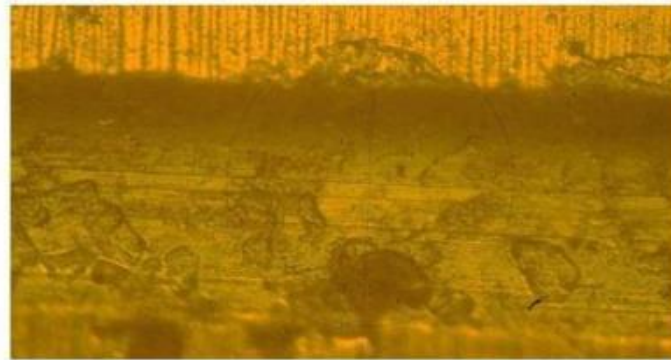


Рисунок 3.18 - Зміна сигналів різних датчиків при дряпанні композиції «TiN (P = 0,06 Па, ІД = 160 А) - сталь ХВГ» при наростаючому навантаженні: ПН - величина нормального навантаження (P); ДП - глибина проникнення індентора (h); СТ значення сили тертя (FN); АЕ - амплітуда сигналу акустичної емісії (Ae); КТ - значення коефіцієнта тертя (μ)



а



б

Рисунок 3.19 - Фотографії подряпин на покритті TiN (режим напилення: $P=0,06$ Па, $I_D = 160$ А) при наростаючюю навантаженні на индентор в діапазонах: а - 15-25 Н; б - 40-45 Н

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 68 |

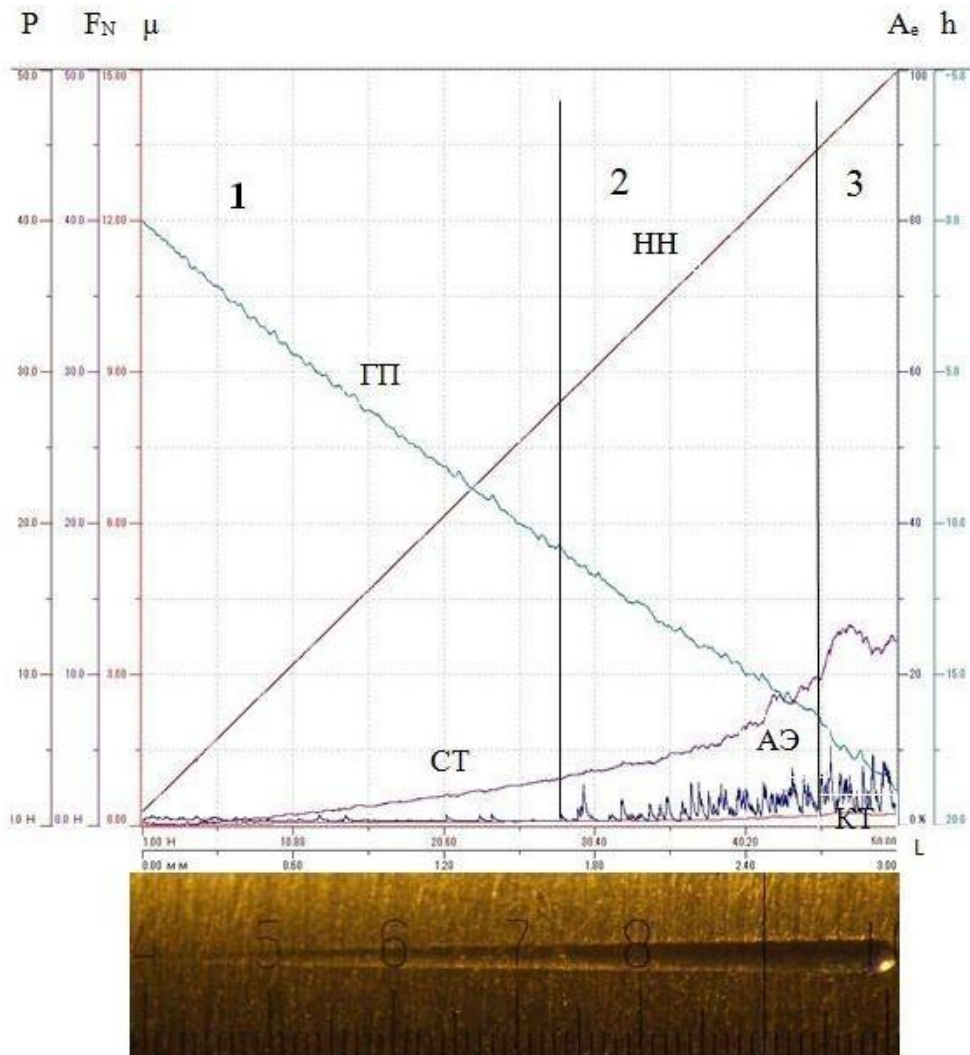
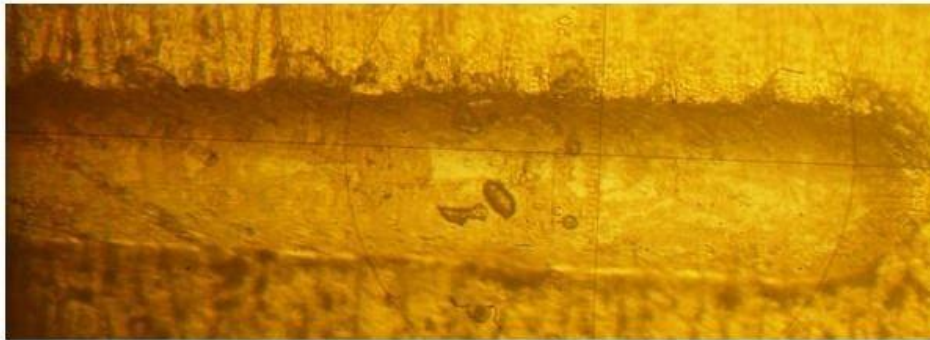


Рисунок 3.20 - Зміна сигналів різних датчиків при дряпанні композиції «TiN (P = 0,06 Па, ID = 140 А) - сталь ХВГ» при наростаючому навантаженні: ПН - величина нормального навантаження (P); ДП - глибина проникнення індентора (h); СТ значення сили тертя (FN); АЕ - амплітуда сигналу акустичної емісії (Ae); КТ - значення коефіцієнта тертя (μ)

| | | | | |
|------|------|----------|--------|------|
| | | | | |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |



а



б

Рисунок 3.21 - Фотографії подряпин на покритті TiN (режим напилення: $P = 0,06$ Па, $ID = 140$ А) при наростаючій навантаженні на індентор в діапазонах: а - 15-25 Н; б - 40-50 Н

При аналізі діаграм адгезійних випробувань процес руйнування покриття нітриду титану при дряпанні алмазним індентором можна розділити на кілька стадій. На першій стадії відбувається монотонне проникнення індентора в покриття, при цьому сила тертя слабо зростає, а амплітуда сигналу акустичної емісії зберігається незмінною. На другій стадії відбувається збільшення амплітуди сигналу акустичної емісії, а також зміна нахилу кривих сили тертя і коефіцієнта тертя. На третій стадії спостерігається різке збільшення сили тертя з 20 до 40 Н. Порівняльний аналіз морфологічних особливостей подряпин дозволяє зробити висновок, що на першій стадії (навантаження ~ 13 Н) індентор залишає рівні незначні сліди на покритті. Ковзання алмазного індентора по покриттю нітриду титану проходить з низьким коефіцієнтом тертя.

Третя стадія пов'язана з проникненням індентора вглиб матеріалу

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 70 |

підкладки, по краях подряпини покриття нітриду титану практично не спостерігається (рисунок 3.17в, 3.19б). При цьому спостерігається зменшення амплітуди сигналу акустичної емісії і різке збільшення сили тертя (до 40 Н) і коефіцієнта тертя за рахунок пропахівання матеріалу підкладки. Результати склерометричних випробувань для покриттів, отриманих при різних режимах іонно-плазмового напилення, наведені в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 - Результати склерометричних випробувань покриттів нітриду титану, отриманих при різних режимах іонно-плазмового напилення

| Режим іонноплазмового напилення покриття TiN | Мікротвердість покриття TiN, ГПа | Результати склерометричних випробувань |
|--|----------------------------------|---|
| P = 0,04 Па, Ід = 120 А, U = 140 В | 19,62 | Фрагментарне когезійне руйнування покриття - вище 28 Н Фрагментарне адгезійне руйнування покриття -49 Н |
| P = 0,04 Па, Ід = 140 А, U = 140 В | 15,68 | Фрагментарне когезійнийруйнування покриття - 26 Н Фрагментарне адгезійне руйнування покриття - вище 45 Н |
| P = 0,04 Па, Ід = 160 А, U = 140 В | 13,45 | Фрагментарне адгезійне руйнування покриття - 20 Н Пропахування матеріалу підложкі- вище - 33 Н |
| P = 0,06 Па, Ід = 140 А, U = 140 В | 12,87 | Фрагментарне адгезійне руйнування покриття - 16 Н Пропахування матеріалу підкладки - вище 40 Н |

Таким чином, склерометричні випробування за допомогою скретч-тестера дозволили визначити адгезійну міцність покриттів нітриду титану, отриманих при різних режимах іонно-плазмового напилення. При тестуванні покриттів можна чітко виділити різні порогові значення критичного навантаження, що призводять до різних типів руйнування. За результатами проведених випробувань встановлено, що найбільшу адгезійну міцність має

покриття нітриду титану, отримане при технологічному режимі (тиск газу в камері $P = 0,04$ Па, ток дуги $I_d = 120$ А, напруга зсуву $U = 140$ В), що забезпечує формування наноструктурованого покриття з найменшим розміром стовпчастих зерен TiN.

При зміцненні можливий супутній ефект - зростання ймовірності крихкого руйнування. Для кожного матеріалу, до якого би класу він не ставився - метал, оксид, нітрид, є свої критичні значення твердості, вище яких погіршуються пластичні властивості і зростає ймовірність крихкого руйнування. У таблиці 3.6 наведені значення параметра пластичності для деяких матеріалів, в тому числі для матеріалів, які використовуються в якості зносостійких покриттів для пар тертя [99]. Чим вище коефіцієнт пластичності покриття, тим вище ресурс роботи через відсутність тріщиноутворення і сколювання.

Таблиця 3.6 - Твердість, модуль Юнга, коефіцієнт Пуассона, коефіцієнт пластичності для різних матеріалів

| матеріал | HV, ГПа | E, ГПа | ν | σ |
|--------------------------------|---------|--------|-------|----------|
| Al ₂ O ₃ | 20,0 | 325 | 0,23 | 0,42 |
| TiC | 24,0 | 465 | 0,19 | 0,46 |
| ZrN | 15,8 | 400 | 0,25 | 0,65 |
| TiN | 20,0 | 440 | 0,25 | 0,60 |
| TiN | 19,3 | 440 | 0,25 | 0,63 |

На підставі результатів проведених досліджень визначено оптимальний режим напилення TiN - напруга зсуву 140 В, тиск реакційного газу в камері 0,04 Па, ток дуги 120 А, при якому формується стовпчасті наноструктуровані покриття з оптимальним поєднанням фізико-механічних, трибологічних і міцних властивостей, що забезпечує підвищення зносостійкості робочої сталевий поверхні деталі «піввісь».

3.2. Заміна матеріалу сталевій піввісь для підвищення ресурсу пари тертя

Нанесення покриття методом іонно-плазмового напилення завжди супроводжується нагріванням деталей в камері ~ до 300 ° С (при операції очищення і активації поверхні іонним бомбардуванням) і ~ до 270 ° С (при нанесенні самого покриття). На рисунку 3.28 наведена температурна крива, отримана за допомогою стаціонарно вбудованого в установку пирометра, яка демонструє температуру деталі в процесі напилення в реальному часі.

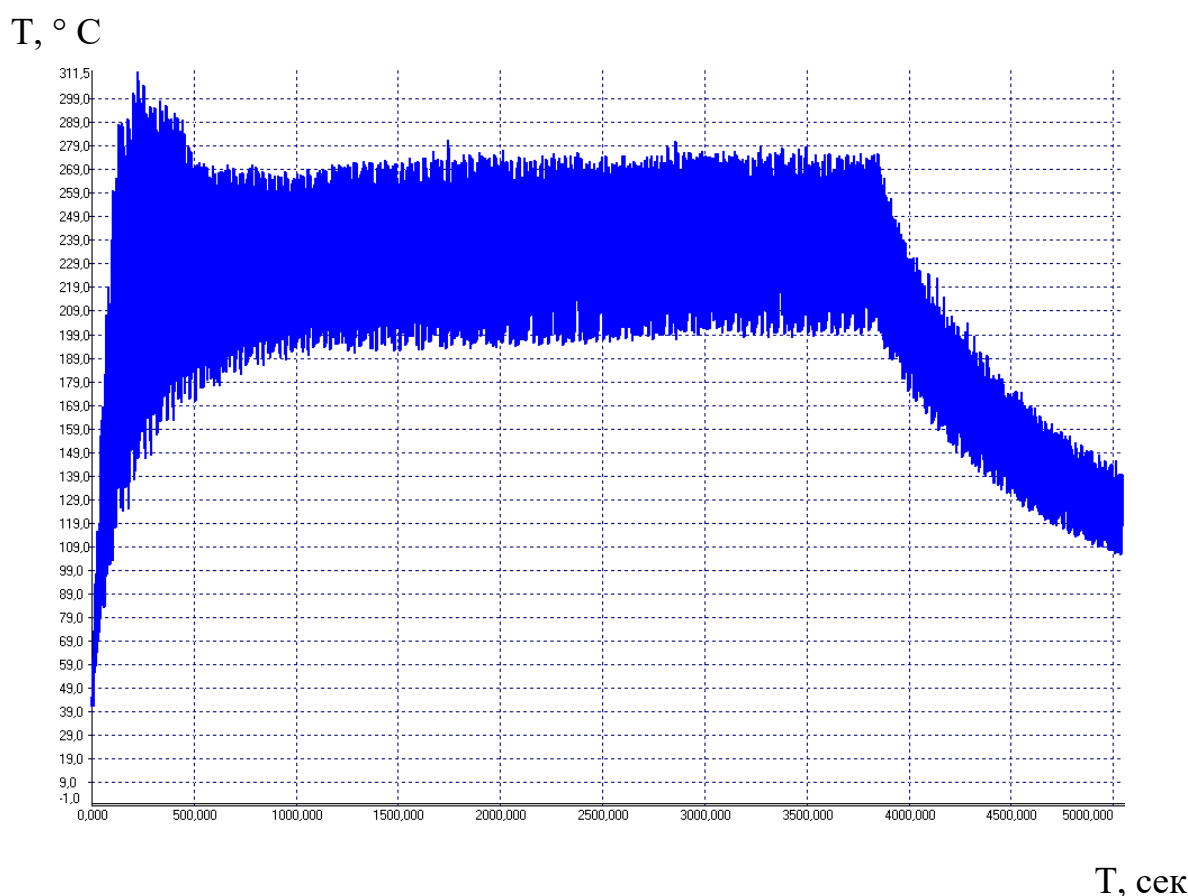


Рисунок 3.22 - Крива зміни температури в часі при іонно плазмовому напиленні покриття нітриду титану

При нагріванні вуглецеві (інструментальні) сталі зазнають ряд послідовних внутрішніх фазових і структурних перетворень, які супроводжуються об'ємними змінами. вихідна структура загартованої

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 73 |

вуглецевої сталі - Тетрагональна мартенсит (структура з максимальним об'ємом) і залишковий аустеніт (структура з мінімальним об'ємом). При перетворенні мартенситу обсяг буде зменшуватися, що призводить до стиснення зразка, а при перетворенні аустеніту - збільшуватися, викликаючи розширення зразка, що добре фіксується на дилатометричні кривих відпуски.

Зміна твердості при відпусці є наслідком структурних змін. Нагрівання до 100 ° С супроводжується слабким підвищенням твердості (на 1-2HRC) внаслідок перетворення тетрагонального мартенситу в відпущений (це слабе підвищення твердості спостерігається лише в високовуглецевих сталях). З подальшим підвищенням температури відпуску твердість падає, внаслідок укрупнення карбідних частинок і збіднення вуглецем твердого розчину. Прямолинійна залежність падіння твердості від температури порушується в діапазоні 200-250 ° С, т. Е. При перетворенні аустеніту. При цих температурах падіння твердості кілька сповільнюється, а в високовуглецевих сталях спостерігається навіть деяке підвищення внаслідок перетворення залишкового аустеніту в більш твердий відпущений мартенсит.

Мікроструктура загартованої сталі ХВГ складається з двох метастабільних складових - мартенситу гарту і залишкового аустеніту (рисунок 3.23).

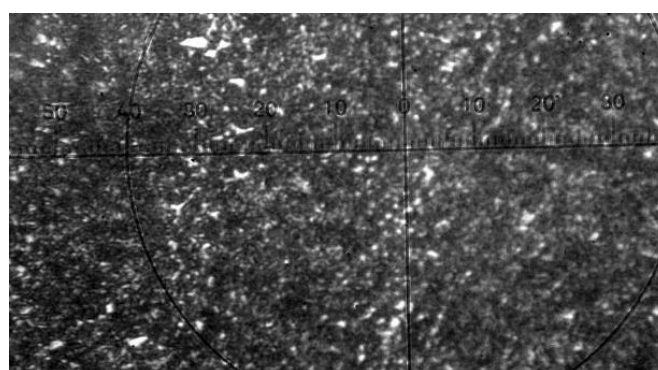
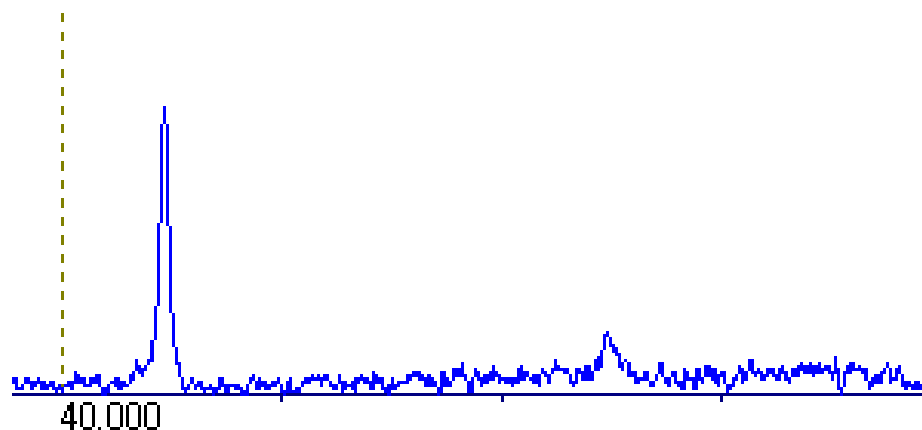


Рисунок 3.23 - Оптична фотографія мікроструктури сталі ХВГ в новій піввісі, x500

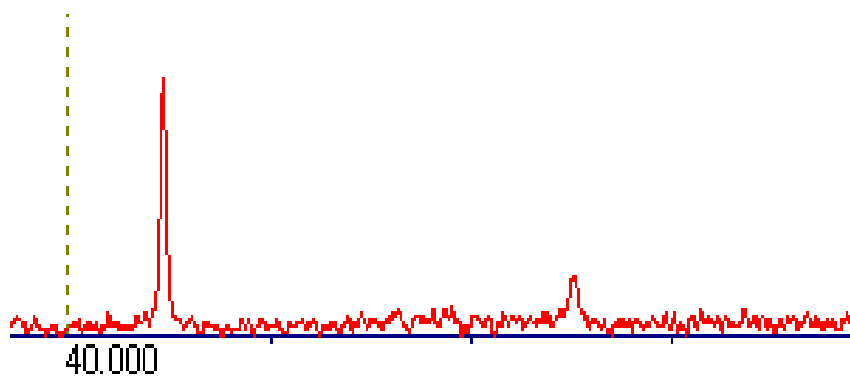
При розробці технології на модельних зразках для зменшення температури нагрівання деталі в процесі іонно-плазмового напилення

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 74 |

покриття нітриду титану для інтенсивного відводу тепла була сконструйована спеціальне мідне оснащення, що дозволило знизити температуру нагрівання підкладки до ~ 200-230 ° С.



а



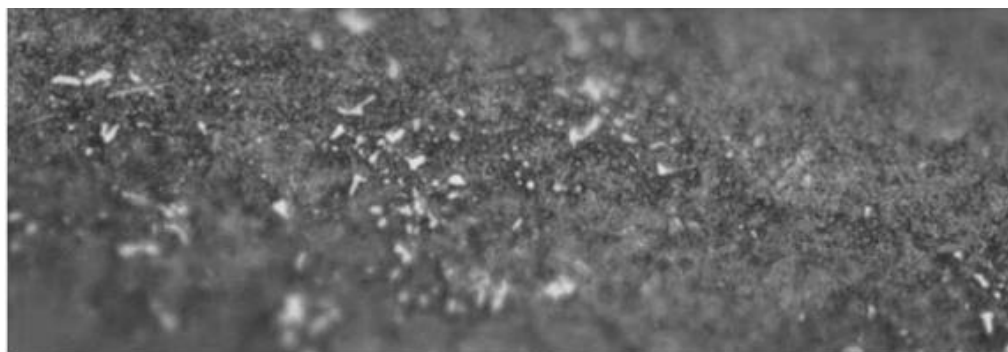
б

Рисунок 3.24 - Дифрактограми матеріалу штатної «піввісь» до (а) і після (б) нанесення покриття TiN

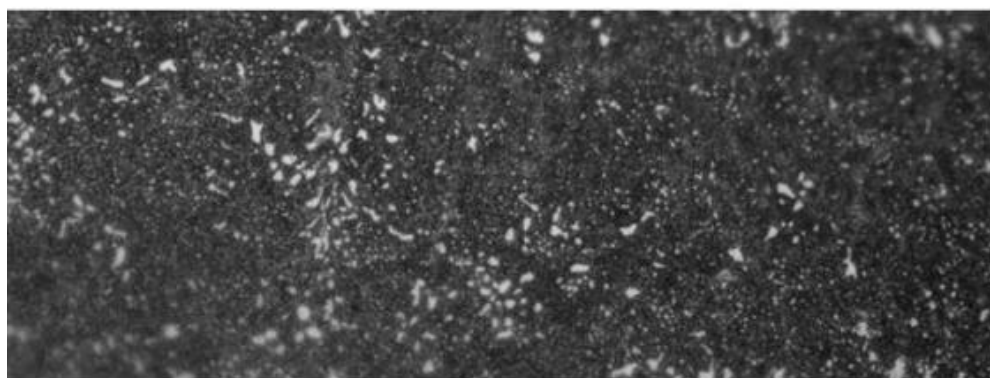
Таблиця 3.7 - Дані рентгеноструктурного аналізу матеріалу «Піввісь» (сталь ХВГ) до і після нанесення покриття TiN

| Стан матеріалу | 2θ , град | d, нм | I, отн.ед. | (hkl) | фаза |
|------------------------------|------------------|--------|------------|-------|--------------|
| початкове | 42,931 | 0,2106 | 0,11 | 111 | γ -Фε |
| | 44,334 | 0,2045 | 1,00 | 011 | α -Фε |
| | 64,115 | 0,1452 | 0,21 | 200 | α -Фε |
| | 66,641 | 0,1650 | 0,27 | 123 | α -Фε |
| Після нанесення покриття TiN | 43,071 | 0,2100 | 0,07 | 111 | γ -Фε |
| | 44,193 | 0,2050 | 1,00 | 011 | α -Фε |
| | 55,838 | 0,1647 | 0,25 | 123 | α -Фε |
| | 64,396 | 0,1446 | 0,25 | 002 | α -Фε |

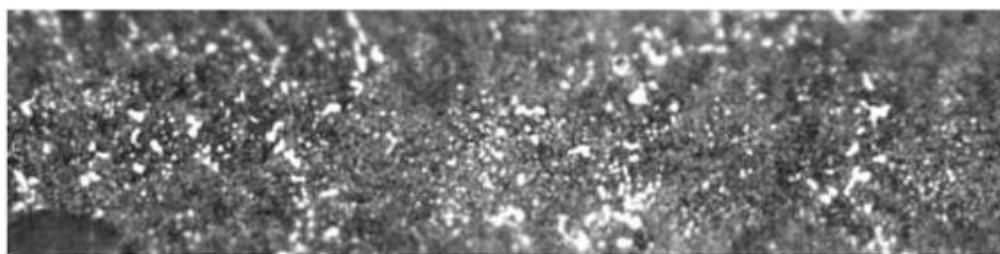
На рисунках 3.25-3.26 представлена мікроструктура основного матеріалу сталі ХВГ після нанесення на сталеву піввісь покриття нітриду титану з досліджуваних режимам.



а



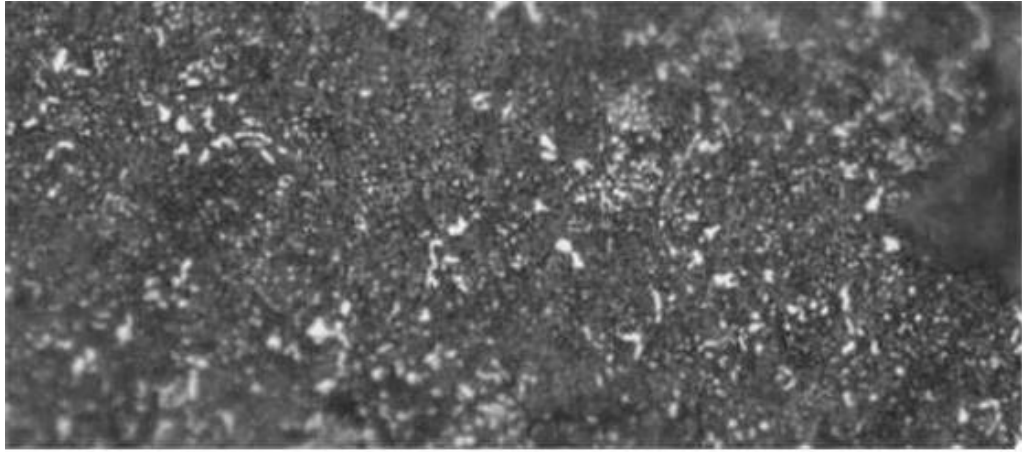
б



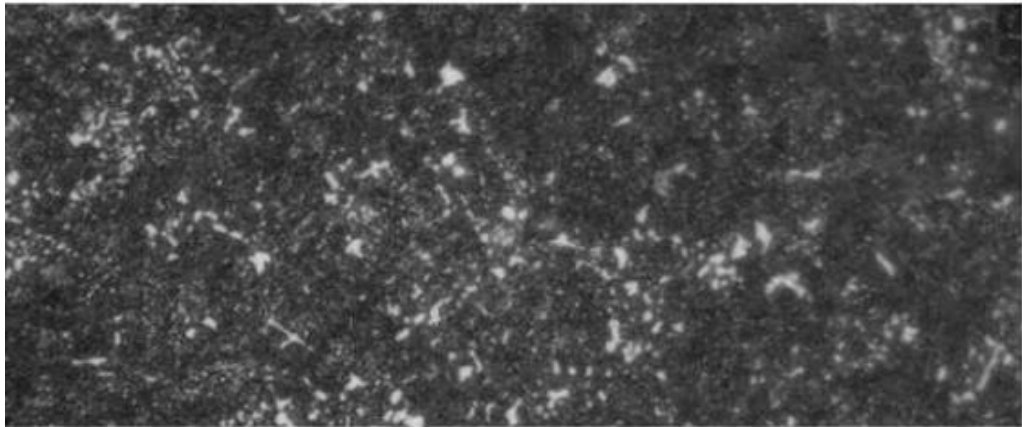
в

Рисунок 3.25 - Оптичні фотографії мікроструктури основного матеріалу (сталь ХВГ) після нанесення на піввісь покриття TiN по режимам: $U = 140$ В, $P = 0,04$ Па: $I_d = 120$ А (а), $I_d = 140$ А (б), $I_d = 160$ А (в), X1000

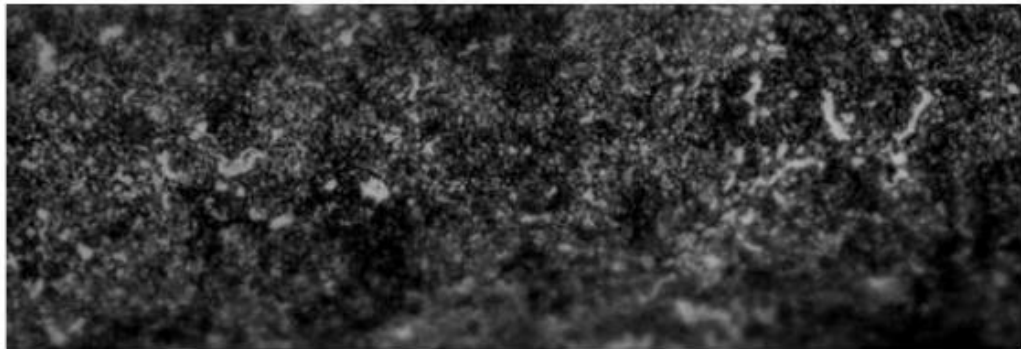
| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 76 |



а



б



в

Рисунок 3.26 - Оптичні фотографії мікроструктури основного матеріалу (сталь ХВГ) після нанесення на піввісь покриття TiN по режимам: $U = 140$ В, $P = 0,06$ Па, $I_d = 120$ А (а), $I_d = 140$ А (б), $I_d = 160$ А (в), $\times 1000$

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 77 |

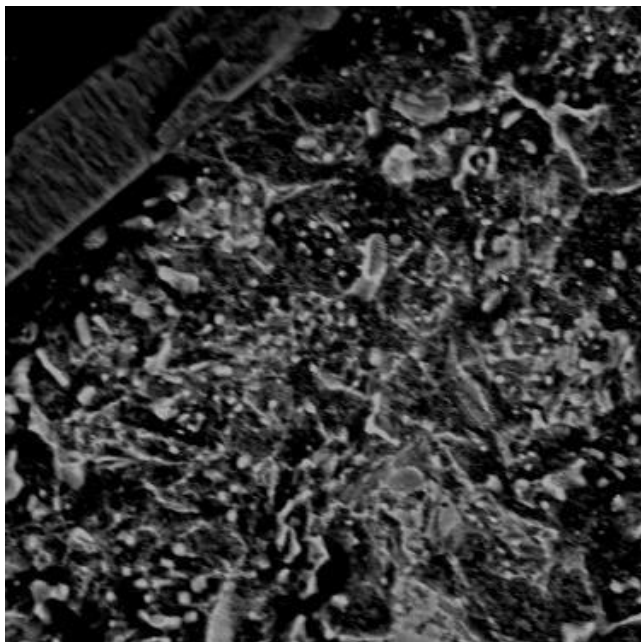
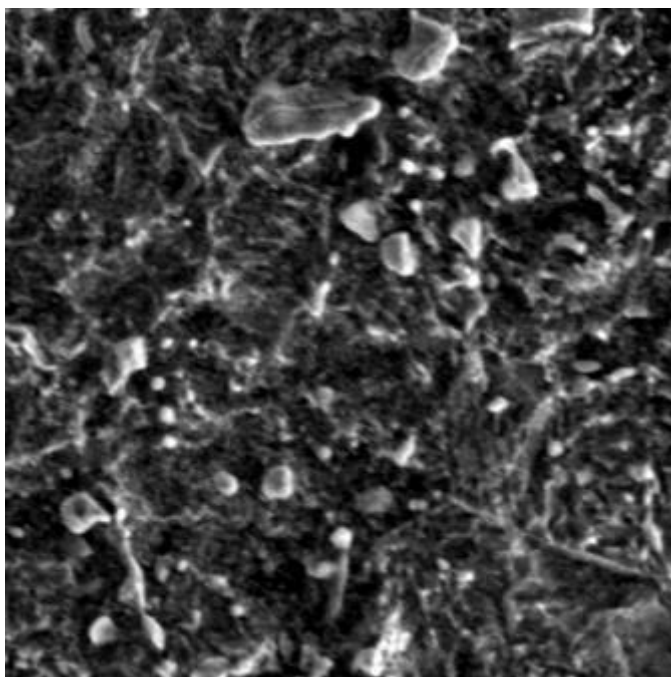


Рисунок 3.27 - Електронна фотографія мікроструктури основного матеріалу (сталь ХВГ) після нанесення на піввісь покриття TiN по режиму: $U = 140 \text{ В}$,



$P = 0,04 \text{ Па}$, $I_d = 120 \text{ А}$, $\times 10000$

Рисунок 3.28 - Електронна фотографія мікроструктури основного матеріалу (сталь ХВГ) після нанесення на піввісь покриття TiN по режиму: $U = 140 \text{ В}$,

$P = 0,04 \text{ Па}$, $I_d = 140 \text{ А}$, $\times 10000$

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 78 |

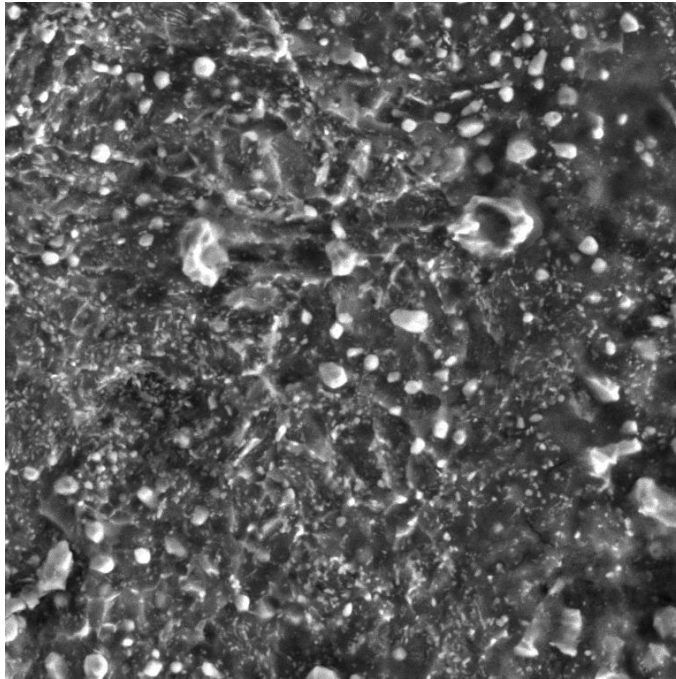


Рисунок 3.29 - Електронна фотографія мікроструктури основного матеріалу (сталь ХВГ) після нанесення на піввісь покриття TiN по режиму: $U = 140 \text{ В}$,
 $P = 0,04 \text{ Па}$, $I_d = 160 \text{ А}$, $\times 10000$

Розмір включень карбідної фази для всіх досліджених режимів напилення становить в середньому $\sim 1 \text{ мкм}$. Зі збільшенням струму дуги до 160 А спостерігається коагуляція карбідних частинок. Зустрічаються окремі глобули розміром від 2 до 5 мкм . Виявлені структурні зміни обумовлені збільшенням температури підкладки під впливом плазмового потоку більшої інтенсивності при збільшенні струму дуги. При цьому твердість основного матеріалу - сталі ХВГ, знижується через коагуляції карбідних частинок і збіднення вуглецем α -твердого розчину.

Для сталевий піввісь, що є деталлю пари тертя, важливими характеристиками, як вихідними, так і після нанесення зносостійкого покриття, є не тільки твердість матеріалу робочої поверхні, але геометричний розмір - діаметр. Якщо діаметр піввісь не вкладається в нормований інтервал $4,929 - 4,934 \text{ мм}$, то дана деталь є некондиційної.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 79 |

На стадії впровадження іонно-плазмова технологія нанесення зносостійкого покриття TiN на нові півосі (по оптимальному режиму: напруга зсуву 140 В, тиск реакційного газу в камері 0,04 Па, ток дуги 120 А) була апробована на дослідній партії деталей в кількості 300 штук. Для вихідних піввісь мікротвердість (Н100) основного матеріалу (ХВГ) перебувала в межах 7,5 - 9,0 ГПа (при вибірці 10%), ~ 20% піввісь мали діаметр на мінімально допустимому рівні (4,929 мм) і ~ 20% на максимально допустимому рівні (4,934 мм) (при вибірці 100%), що суперечить технічним вимогам креслення на дані деталі.

У таблиці 3.8 наведені середні значення мікротвердості основи і геометричні параметри деяких піввісь зі сталі ХВГ (з дослідної партії) до і після нанесення покриття нітриду титану по оптимальному режиму. Всі вимірювання були проведені на поверхні піввісь, частина якої не була закрита покриттям нітридом титану (неробоча - з боку фаски).

Таблиця 3.8 - Порівняльна таблиця характеристик вихідного матеріалу ХВГ піввісь до і після нанесення покриттів

| Марка сталі | Мікротвердість основи, Н ₁₀₀ , ГПа | Мікротвердість основи після нанесення покриття, Н ₁₀₀ , ГПа | геометричні розміри | | | |
|-------------|---|--|----------------------------------|-------|---|-------|
| | | | Діаметр вихідної піввісь, 10-3 м | | Діаметр півосі після нанесення покриття, 10-3 м | |
| | | | min | max | min | max |
| ХВГ | 8,25 | 7,5 | 4,929 | 4,931 | 4,927 | 4,930 |
| | | | 4,930 | 4,932 | 4,928 | 4,930 |
| | | | 4,931 | 4,933 | 4,928 | 4,931 |
| | | | 4,934 | 4,934 | 4,932 | 4,933 |
| | | | 4,932 | 4,933 | 4,933 | 4,934 |

В результаті проведеного вихідного контролю дослідної партії піввісь зі сталі ХВГ з покриттям нітриду титану встановлено:

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 80 |

- в зв'язку з відпускою основного матеріалу мікротвердість знижується в ~ 1,1 рази, що укладається у вимоги креслення;

- ~ 17% деталей в зв'язку з геометричними змінами (по діаметру) не відповідають вимогам креслення.

Для вирішення даної технічної проблеми при переході до серійного випуску деталей в роботі була запропонована заміна штатного матеріалу піввісь - сталі ХВГ на інструментальну сталь марки Х12Ф1, яка володіє більш високою стійкістю структурно-фазового стану при нагріванні до ~ 300 ° С, за рахунок більшого процентного вмісту хрому та інших легуючих добавок (таблиця 2.1).

У таблиці 3.9 наведені в порівнянні середні значення мікротвердості основи і геометричні розміри деяких піввісь зі сталі Х12Ф1 (партия в кількості 200 штук) до і після нанесення покриття нітриду титану по оптимальному режиму. Всі вимірювання були проведені на поверхні піввісь, частина якої не була закрита покриттям нітридом титану (неробоча - з боку фаски).

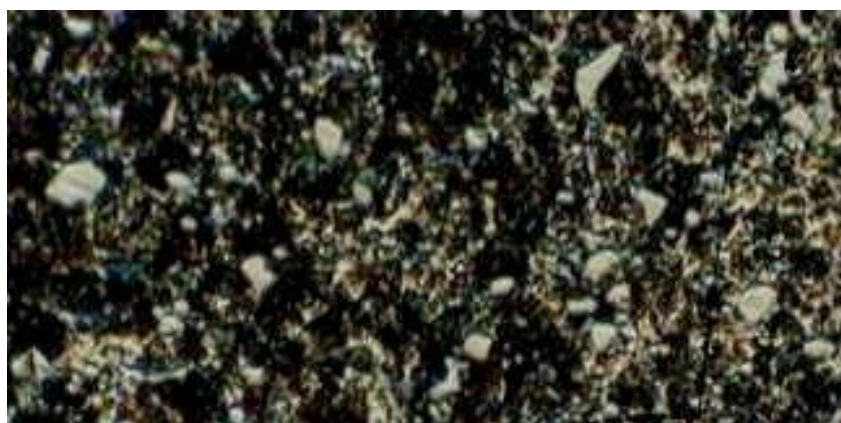
Таблиця 3.9 - Порівняльна таблиця характеристик вихідного матеріалу піввісь (сталь Х12Ф1) до і після нанесення покриттів

| Марка сталі | Мікротвердість основи, Н ₁₀₀ , ГПа | Мікротвердість основи після нанесення покриття, Н ₁₀₀ , ГПа | геометричні розміри | | | |
|-------------|---|--|----------------------------------|-------|---|-------|
| | | | Діаметр вихідної піввісь, 10-3 м | | Діаметр півосі після нанесення покриття, 10-3 м | |
| | | | min | max | min | max |
| Х12Ф1 | 8,4 | 8,9 | 4,930 | 4,931 | 4,930 | 4,930 |
| | | | 4,930 | 4,932 | 4,930 | 4,932 |
| | | | 4,929 | 4,931 | 4,929 | 4,931 |
| | | | 4,933 | 4,934 | 4,932 | 4,934 |
| | | | 4,930 | 4,932 | 4,930 | 4,932 |

На рисунку 3.30 наведено фотографії мікроструктури матеріалу вихідної піввісь зі сталі X12Ф1 і піввісь після нанесення покриття (по оптимальному режиму: напруга зсуву 140 В, тиск реакційного газу в камері 0,04 Па, ток дуги 120 А). Мікроструктура сталі - кондиційна, відповідає ГОСТу для даної марки в стані після гарту і низького відпуски. У структурі матеріалу піввісь спостерігається крім мартенситу наявність великої кількості карбідної фази складного складу (Cr, Fe) $23C_6$ і Mo_2C , VC . Методом рентгеноструктурного аналізу (таблиця 3.10) показано, що фазовий склад сталі X12Ф1 до і після нанесення іонно-плазмового покриття нітриду титану ідентичний і являє собою).



а



б

Рисунок 3.30 - Оптичні фотографії мікроструктури сталі X12Ф1 для вихідної піввісь (а) і після нанесення покриття TiN по режиму: $U = 140$ В, $P = 0,04$ Па, $I_D = 120$ А (б), $\times 250$

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 82 |

Таблиця 3.10 - Дані рентгеноструктурного аналізу матеріалу нової «Піввісь» (сталь Х12Ф1) до і після нанесення покриття TiN

| стан матеріалу | 2θ , град | d, нм | I, отн.ед. | (Hkl) | фаза |
|------------------------------|------------------|--------|------------|-------|-------------------|
| початкове | 18,3 | 0,2360 | 0,04 | 112 | Fe ₃ C |
| | 19,3 | 0,2160 | 0,12 | 111 | γ -Фε |
| | 20,18 | 0,2032 | 1,00 | 011 | α -Фε |
| | 22,59 | 0,1814 | 0,04 | 002 | γ -Фε |
| | 28,55 | 0,1445 | 0,13 | 002 | α -Фε |
| | 32,55 | 0,1270 | 0,01 | 022 | γ -Фε |
| | 34,3 | 0,2050 | 0,02 | 210 | Fe ₃ C |
| | 35,3 | 0,1173 | 0,24 | 112 | α -Фε |
| | 36,84 | 0,1125 | 0,02 | 310 | Fe ₃ C |
| | 40,92 | 0,1019 | 0,06 | 022 | α -Фε |
| | 45,97 | 0,0912 | 0,05 | 013 | α -Фε |
| | 55,05 | 0,0770 | 0,05 | 123 | α -Фε |
| Після нанесення покриття TiN | 18,45 | 0,2222 | 0,04 | 112 | Fe ₃ C |
| | 19,68 | 0,2079 | 0,11 | 111 | γ -Фε |
| | 20,15 | 0,2032 | 1,00 | 011 | α -Фε |
| | 22,68 | 0,1805 | 0,05 | 002 | γ -Фε |
| | 28,68 | 0,1434 | 0,14 | 002 | α -Фε |
| | 32,32 | 0,1279 | 0,03 | 022 | γ -Фε |
| | 34,49 | 0,1201 | 0,03 | 210 | Fe ₃ C |
| | 35,32 | 0,1173 | 0,27 | 112 | α -Фε |
| | 37,03 | 0,1122 | 0,02 | 310 | Fe ₃ C |
| | 37,92 | 0,1094 | 0,02 | 113 | γ -Фε |
| | 40,95 | 0,1016 | 0,07 | 022 | α -Фε |
| | 46,11 | 0,0907 | 0,07 | 123 | α -Фε |
| | 55,61 | 0,0763 | 0,04 | 004 | α -Фε |

В результаті проведених досліджень встановлено, що матеріал піввісь зі сталі ХВГ в процесі нанесення покриття TiN зазнає структурні зміни внаслідок супутнього відпуски, що призводять до фізичних і геометричних змін деталей. Експериментально доведено, що сталь Х12Ф1 не має схильності до даних явищ у зв'язку з високою стійкістю структурно-фазового стану при нагріванні до ~ 300 ° С під час іонно-плазмового напилення зносостійкого покриття нітриду титану.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 83 |

РОЗДІЛ 4. Практичне застосування наноструктурованих покриттів нітриду титану

4.1. Вузол тертя газової центрифуги К4110 - «піввісь - підшипник»

За розробленим технологічним процесом виготовлена дослідна піввісь з зносостійким покриттям нітриду титану (рисунок 4.1). Деталі успішно пройшли динамічні випробування, які проводилися у форсованому режимі. Перевірено живучість вала в аварійних режимах гальмування від номінальної частоти до повної зупинки при постійному контакті в підшипнику ковзання.

Проведені випробування показали цілісність покриття під час всього циклу випробувань і його високу зносостійкість. Нанесення покриття нітриду титану дозволило збільшити кількість безаварійних проходів через критичні точки в 3 рази і збільшити при цьому допустимий згинальний дисбаланс піввісь під час її балансування в 1,5 рази.



Рисунок 4.1 - Піввісь обмежувального підшипника ковзання: вихідні і з наноструктурованих покриттям нітриду титану

Інженерія поверхні, заснована на методах спрямованого створення зміцнених поверхневих шарів - це ефективний засіб досягнення динаміки і

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 84 |

міцності деталей машин в сучасному машинобудуванні. Поряд з поліпшенням техніко-економічних характеристик відповідальних деталей машин і елементів конструкцій паралельно вирішується проблема економії матеріалів і споживання енергії. В умовах загострення економічних криз при нестачі фінансових і матеріальних ресурсів рішення задачі економії набуває першочергового значення. Структура економії включає компоненти прямої і непрямої економії.

- зниження простоїв машин внаслідок підвищення їх надійності та довговічності;
- зниження витрат на ремонт і відновлення машин;
- зниження витрат на матеріали при заміні дорогих сплавів більш дешевими при виготовленні масивних деталей;
- зниження витрат мастильних матеріалів;
- можливість багаторазового відновлення деталей;
- підвищення продуктивності роботи машин;
- зниження браку внаслідок підвищення технологічної надійності роботи машин;

4.2 Деталі системи віброізоляції тренажера - штоки

Розроблена система віброізоляції тренажера «Бігова доріжка» БД-2. Розроблене зносостійкі наноструктуровані покриття нітриду титану впроваджено на дослідній партії деталей для підвищення зносостійкості робочих поверхонь (рисунок 4.2).

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 85 |



а



Рисунок 4.2 - Деталі системи віброізоляції тренажера БД-2 –
вихідні і із зносостійким покриттям нітриду титану

4.3 Плунжерні пари паливних насосів автомобільних двигунів

Розроблене іонно-плазмові Наноструктуровані покриття нітриду титану впроваджено (через НВЦ «Трибоніка») для підвищення ресурсу плунжерних пар автомобільних паливних насосів на машинобудівних підприємствах Казахстану. Покриття показало ефективне підвищення зносостійкості робочої поверхні сталевих плунжерів за рахунок підвищення твердості поверхні ~ в 2 рази, зниження коефіцієнта тертя і інтенсивності

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 86 |

зношування в $\sim 1,8$ і в 4 рази відповідно. На рисунку 4.3 представлені плунжери різної конфігурації з зносостійким Наноструктуровані іонно-плазмовим покриттям нітриду титану.



Рисунок 4.3 - плунжер з покриттям TiN

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 87 |

ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

1. Встановлено причини передчасної відмови і зниженої працездатності деталей відповідальних вузлів тертя газової центрифуги - «Піввісь-підшипник».

2. Для підвищення ресурсу пари тертя «піввісь-підшипник», розроблений і науково обґрунтований метод поверхневого зміцнення сталевих деталей «Піввісь» за допомогою іонно-плазмового нанесення зносостійкого покриття нітриду титану.

3. Розроблено технологічний процес іонно-плазмового нанесення (методом КІБ на установці ВУ2-МБС) зносостійкого столбчатого наноструктурованого покриття нітриду титану з оптимальним поєднанням експлуатаційних властивостей.

4. При комплексному підході до модернізації деталі «піввісь» пари тертя «Піввісь-підшипник» здійснена заміна матеріалу (сталь ХВГ на сталь Х12Ф1).

5. Результати натурних випробувань пари тертя «піввісь-підшипник» у форсованому режимі показали цілісність покриття під час всього циклу випробувань і його високу зносостійкість.

6. Нанесення покриття нітриду титану дозволило збільшити кількість безаварійних проходів через критичні точки в 3 рази і збільшити при цьому допустимий згинальний дисбаланс піввісь під час її балансування в 1,5 рази.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 88 |

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гаркунов, Д.Н. Триботехника / Д.М. Гаркунов, Е.Л. Мельников, В.С. Гаврилюк - М.: КРОНУС, 2015. - 408 с.
2. Огляд російського ринку мастильних матеріалів [Електронний ресурс]. URL: <http://www.ey.com>
3. Терміни служби тертьових деталей [Електронний ресурс]. URL: <http://www.studjpedia.ru>
4. Балабанов, В.І. Нанотехнології / В.І. Балабанов. - М.: Ексмо, 2010. - 214 с.
5. Інженерія поверхні і розвиток сучасного машинобудування [Електронний ресурс]. URL: <http://www.mehanik-ua.ru>
6. Локтев, Д. Методи та обладнання для нанесення зносостійких покриттів / Д.Локтев, Е. Ямашін // наноіндустрії, 2007. - №4. - с.18-24.
7. Погребняк, А.Д. Багатокомпонентні нанокompозитні покриття з адаптивним поведінкою в поверхностоноій інженерії / А.Д. Погребняк, А.А. Багдасарян, А.В.Пшк, К.А. Дадюра // УФН, 2017. - т. 187. - №6. - с.629-652.
8. Берсенев, В.М. Нанокристалічні і нанокompозитні покриття, структура, властивості / В.І. Берсенев, А.Д. Погребняк, Н.А. Азаренков, В.І. Фареник, Г.В. Кирик // ФІП ФІП PSE, 2007. - т.5. - №1-2. - с. 4-27.
9. Берлін, Е.В. Іонно-плазмові процеси в тонкопленочній технології / Є.В. Берлін, Л.А. Сейдман - М.: Техносфера, 2010. - 528 с.
10. Musil, J. Hard nanocomposite coatings. Present status and trends. Chapter1 in Handbook of plasma surface engineering research and its practical application / J. Musil, P. Baroch, P. Hard // Research Singpost. - 2008. - P.1-34.
11. Drory, MD Deposition and characteristics of chromium nitride thin film coatings on precision balls for tribological applications / MD Drory, RD Evans // Surf. Coat. Technol. - 2011. - Vol. 206. - P. 1983-1989.
12. Азаренков, Н.А. Наноструктурні покриття і наноматеріали: основи

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 89 |

- отримання, властивості, області застосування: Особливості сучасного наноструктурного напрямки в нанотехнології / Н.А. Азаренков, В.М. Береснев, А.Д. Погребняк, Д.А. Колесніков. - М.: Либроком, 2013. - 368 с.
13. Якупов, С.Н. Тонкошарові плівки і покриття / Н.М. Якупов // Матеріали 13 Міжнародної конференції «Плівки і покриття -2017». - Санкт-Петербург 18-20 квітня 2017. - С.52-55.
 14. Погребняк А.Д. Структура і властивості твердих і надтвердих нанокompозитних покриттів / А.Д. Погребняк, А.П. Шпак, Н.А. Азаров, В.М. Береснев // УФН, 2009. - т. 179. - №1. - с.35-64.
 15. Öztürk, A. Comparative tribological behaviors of TiN, CrN and MoNCu nanocomposite coatings / A.Öztürk, KV Ezirmik, K. Kazman, M.Ürgen, OLEryılmaz, A.Erdemir // Tribology International. - 2008. - Vol.41. - P.49-59.
 16. Lin, J The structure and mechanical and tribological properties of TiBCN nanocomposite coatings \ J. Lin, JJMoore, B. Mishra, M Pinkas, WDSproul //Acta Materialia. - 2010. - Vol. 58. - P.1554-1564.
 17. Pogrebnyak, AD Microstructure, physical and chemical properties of nanostructured (Ti-Hf-Zr-V-Nb) N coatings under different deposition conditions / ADPogrebnyak, AD IVYakushchenko, AABagdasaryan, OVBondar , R.Krause-Rehberg, G.Abadias, P.Chartier, K.Oyoshi, Y.Takeda, VMBeresnev, OVSobolf //Materials Chemistry and Physics. - 2014. - Vol.147. - P.1079-1091.
 18. Barshilia, Harish C. Performance evaluation of TiAlCrYN nanocomposite coatings deposited using four-cathode reactive unbalanced pulsed direct current magnetron sputtering system /Harish C.Barshilia, Shashidhara Acharya, Moumita Ghosh, TNSuresh, KSRajam, Manohar S.Konchady, Devdas M.Pai, Jagannathan Sankar//Vacuum. - 2010. - Vol.85. - P.411-420.
 19. Faga, MG AlSiTiN nanocomposite coatings developed via Arc Cathodic PVD:

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 90 |

- Evaluation of wear resistance via tribological analysis and high speed machining operations /MGFaga, G.Gautier, R.Calzavarini, M.Perucca, E.AimoBoot,F.Cartasegna,L.Settineri//Wear. - 2007. - Vol.263. - P.1306-1314.
- 20.Barshilia, HC Deposition and characterization of TiAlSiN nanocomposite coatings prepared by reactive pulsed direct current unbalanced magnetron sputtering / HC Barshilia, M. Ghosh, R. Ramakrishna, KS Rajam // Applied Surface Science. - 2007. - Vol.256. - P.6420-6426.
- 21.Martinez, G. Effect of Thickness on the Structure, Composition and Properties of Titanium Nitride NanoCoatings / G. Martinez et al. // Ceramics International. - 2014. - v. 4. - P. 5757-5764.
- 22.Meng, Li-Jian.Characterization of titanium nitride falms prepared by dc reactive magnetron sputtering at dufferent nitrogen pressures / Li-Jian Meng, MP Santos
// Surface and Coatings Technology. - 1997. - V. 90. - P. 64-70.
- 23.Громов, Д.Г. Металізація в системах з нанорозмірними елементами: навч. посібник для студентів техвузов / Д.Г. Громов. - М .: МІЕТ; Москва: АСТ, 2011. - 60 с.
- 24.Методи нанесення вакуумних покриттів PVD-покриттів. Курс лекцій / Укладач: доцент Жданов А.В. - Володимир. - 2014. - 161 с.
- 25.Ahaitouf, Az. Process Technology study of TiN / AlGaN / GaN Schottky contact on (111) Silicon substrate / Az. Ahaitouf, JC Gerbedoen, A. Soltani // J. Mater. Environ. Sci. - 2010. - Vol 1. - P. 309-312.
- 26.Табаков, В.П. Принципи формування та технології нанесення зносостійких покриттів ріжучого інструменту \ В.П. Табаков, А.С.Верещака, А.А. Верещака, А.Д. Батаков. - Ульяновськ: УЛГТУ, 2012. - 196 с.
- 27.Будилів, В.В. Нанотехнології обробки поверхні деталей на основі вакуумних іонно-плазмових методів: фізичні і технічні рішення / В.В. Будилів, В.С. Мухін, С.Р. Шехтман. - М .: Наука, 2008. - 194 с.
- 28.Saoula, N. Influence of nitrogen content on the structural and mechanical

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 91 |

properties of tin thin films / Nadia, Karim Henda et Rafika Kesri // j. Plasma fusion res. Series. - 2009. - Vol. 8. - p. 1403-1407.

- 29.Сушенцов, Н.І. зміцнюючі тонкоплівкові покриття на основі нітриду і вуглецевих матеріалів / Н.І. Сушенцов, С.В. Борисов // Приволзький науковий вісник, 2014. - №3 (31). - с. 31-38.
- 30.Самойлович, М.І. Формування наноструктурованих плівок алмазоподібних матеріалів / М.І. Самойлова, А.Ф. Беянин // Нано і мікросистемна техніка, 2006. - №7. - с.21-34.
- 31.Сушенцов Н.І. Шаруваті захисні покриття на основі нітриду і вуглецю / Н.І. Сушенцов, С.В. Борисов // Приволзький науковий вісник, 2014. - №6 (34). - с. 23-29.
- 32.Montemor, MF Functional and smart coatings for corrosion protection: a review of recent advances / MF Montemor // Surface and Coatings Technology. - 2014. - Vol.258. - p.17-37.
- 33.Спосіб отримання однофазних плівок нітриду титану [Електронний ресурс]. URL:<http://www.findpatent.ru/patent/249/2497977.html>
- 34.Лохатніков, Ю.В. Хімічне осадження наноструктурованих покриттів вольфраму і його сплавів з газової фази / Ю.В. Лохатніков // Фізикохімія поверхні і захист матеріалів, 2008. - №4. - с.343-358.
- 35.Гончаров, О.Ю. Текстури покриттів молибдену, танталу і бориди гафнію, отриманих хімічним газофазним осадженням / О.Ю. Гончаров, І. А. Ільїн, Д.Б. Титаря, Д.В. Тіторова // Перспективні матеріали., 2008. - №4. - с.69-73.
- 36.Фукс, С.Л. Багатошарове композитне покриття на сталі, отримане методом хімічного осадження / С.Л. Фукс, С.В. Хітрін, Л.Н. Зикіна, Ю.С. Сайтжанова. - Патент на винахід №254718. - 2015.
37. Отич, Н.А. Отримання композиційних покриттів хімічним осадженням / Н.А.Отич, М.Ю. Сербиновского, Н.Л. Ігнатенко, В.Т. Логінов, П.Д. Дерлугян, М.С. Ліпкин, Г.А. Данюшіна // Изв. Вузів. Сев.-Кавк. Регіон. Технічного науки, 2005. - №4. - с.56-58.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 92 |

38. Кузнецов, А.В. Безструмової хімічні і електрохімічні методи отримання покриттів в сольових розплавах / А.В. Кузнецов // Матеріали 13 Міжнародної конференції «Плівки і покриття -2017». - Санкт-Петербург 18-20 квітня 2017. - с.90-92.
39. CVD-покриття [Електронний ресурс]. URL: <http://www.sandvik.coromant.com>
40. Бойцов, А.Г. Конспект лекцій (теоретичний матеріал) з дисципліни «Інноваційні технології виробництва виробів ракетно-космічної техніки». - Москва, 2015. - 365 с.
41. Філатов, М.С. Отримання композитів Ni-ZrO₂ з різною концентрацією металевої фази методом магнетронного ВЧ реактивного напилення / М.С. Філатов, О.В. Стогній // Матеріали 13 Міжнародної конференції «Плівки і покриття -2017». - Санкт-Петербург 18-20 квітня 2017. - с.106-109.
42. Кам'янецьких, А.С. Свойства VN покриттів, отриманих магнетронним розпиленням В і VN мішеней в умовах генерації плазми пучком низькоенергетичних електронів / А.С. Кам'янецьких, Н.В. Гаврилов, О.В. Корякова, С.О. Чолах // Матеріали 13 Міжнародної конференції «Плівки і покриття -2017». - Санкт-Петербург 18-20 квітня 2017. - с.134-137.
43. Мубояджян, С.А. Іонно-плазмові нанослойні ерозійно-стійкі покриття на основі карбідів і нітридів металів / С.А. Мубояджян, Д.А. Александров, Д.С. Горлов // Метали, 2010. - №5. - с.39-51.
44. Соболев, О.В. Апробація структурного підходу для оптимізації режимів отримання покриттів, що підвищують зносостійкість лопаток турбін / О.В. Соболев, В.В. Дмитряков, Н.А. Погрібний, Н.В. Пінчук, А.А. Мефїліхов // Східно-Європейський журнал передових технологій, 2015. - №2 / 5 (74). - С.53-59.
45. Качалін, Г.В. Вивчення зносостійкості іонно-плазмових покриттів на

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 93 |

- основі титану і алюмінію, отриманих методом магнетронного розпилення / Г.В. Качалін, А.Ф. Медников, А.Б. Тхабісімов, С.В. Сидоров // Матеріали 13 Міжнародної конференції «Плівки і покриття -2017». - Санкт-Петербург 18-20 квітня 2017. - с.211-214.
- 46.Сергєєв, В.П. Формування оптично прозорих нанокompозитних захисних покриттів на стеклах методами іонної імплантації та магнетронного розпилення для космічних застосувань / В.П. Сергєєв, М.П. Калашников, І.А. Божко, Е.В. Рибалко, О.В. Сергєєв, А.В. Воронов, М.В. Федорищева // Матеріали 13 Міжнародної конференції «Плівки і покриття -2017». - Санкт-Петербург 18-20 квітня 2017. - с.476-479.
- 47.Xiang, Wenfeng. Heteroepitaxial growth of TiN thin films on Si substrates for MEMS applications \ Wenfeng Xiang, Chongyang Zhao, Kun Liu, Guling Zhang, Kun Zhao \ Journal of Alloys and Compounds. 2016. - Vol. 658. - P.862 - 866.
- 48.Craciun, D. Very hard TiN thin films grown by pulsed laser deposition / N. Stefan, G. Socol, G. Dorcioman, E. McCumiskey, M. Hanna, CR Taylor, G. Bourne, E. Lambers, K. Siebein, V. Craciun // Applied Surface Science. 2012. - Vol. 260. - P. 2 - 6.
- 49.Юр'єв, Ю.Н. Властивості плівок нітриду титану, отриманих методом магнетронного розпилення / Ю.М. Юр'єв, К.С. Міхневич, вВ.П. Кривобоков, Д.В. Сиделев, Д.В. Кисельова, В.А. Новиков \ Известия Самарського наукового центру РАН, 2014. - т. 16, №4. - с. 672-676.
- 50.Yurjev, YN Technological Peculiarities of Deposition Anti-Reflective Layers in Low-E Coatings / YN Yurjev, DV Sidelev // Journal of Physics: Conference Series. 2013. - Vol. 479. - № 1. Article Number - 012018. - p. 1-4.
- 51.Musil, J. Discharge in Dual Magnetron Sputtering System / J. Musil, P. Baroch // IEEE Transactions on Plasma Science. 2005. - Vol. 33. - № 2. - p. 338-339.
- 52.Зайцев, С.В. Плівки нітриду титану формуються методом дуального магнетронного розпилення / С.В. Зайцев, В. С. Ващилін, Д.С.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 94 |

Прохоренков

// Нова наука: проблеми і перспективи, 2016. - №6-2 (85). - с.176-179.

53.Єрофєєв, Е.В. Дослідження електрофізичних параметрів тонких плівок нітриду титану, отриманих методом магнетронного розпилення / Є.В. Єрофєєв, І.В. Федін, А. І. Казиміров // Вісник СіБГУТІ, 2015. - №3 (31).

- С.29-34.

54.Достанко, А.П. Формування плівок нітриду титану методом реактивного магнетронного розпилення при зниженому тиску / А.П. Достанко, Д.А. Голосів, С.М. Завадський, С.Н. Мельников, Д. Е. Окоджі, Д.Д. Котінго, Г.М. Рубан // Проблеми фізики, математики та техніки, 2016. - №2 (27). - С.12-17.

55.Ермленко, М.В. Тріблогіческіє характеристики покриттів TiN, отримані методом реактивного магнетронного розпилення при зниженому тиску // М.В. Єрмоленко, С.М. Завадський, Д.А. Голосів, С.Н. Мельников, Є.Г. Замбург // Тертя і знос, 2016. - т.37, №3. - с.369- 373.

56.Kim, Hong Tak. Effect of Substrate Temperature and Input Power on TiN Film Deposition by LowFrequency (60 Hz) PECVD / Hong Tak Kim, Chan Su Chae, Dae Hee Han and Duck Kyu Park // Journal of the Korean Physical Society. - 2000. - Vol. 37. - № 3. - p. 319-323.

57.Спосіб реактивного іонного травлення шару нітриду титану селективно до алюмінію і двоокису кремнію [Електронний ресурс]. URL:<http://www.freepatent.ru/patents/2392689>

58.Xinlei, Xu. High quality TiN film preparation by multi-arc ion plating // Materials Protection. 2000. - Vol. 33. - №8. - p. 28-32. Чжан, Ле.

59.Розподіл елементів в покриттях нітриду титану, отриманих вакуумно-дуговим осадженням з різним потенціалом зміщення / Ле Чжан, Є.Б. Кашкаров // Перспективи розвитку фундаментальних наук. Збірник наукових праць XII Міжнародної конференції студентів та молодих вчених. Національний Томський політехнічний університет, 2015. - с.302-

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 95 |

304.

- 60.Lina, Tong. Influence of bias on structure and deposition rate of TiN thin films by arc ion plating / Tong Lina, Meng Fanyu, Wang Lige, Huang Meidong // Proceedings of 10th International conference on vacuum metallurgy and surface engineering. - 2011. - P. 237-241.
- 61.Zhang, GP Influence of pulsed substrate bias on structure and properties of Ti-Al-N films deposited by cathodic vacuum arc / GP Zhang, GJ Gao // Applied Surface Science. - 2012. - Vol. 258. - P. 7274-7279.
- 62.Кашкаров Є.Б. Вплив потенціалу зміщення на структуру і розподіл елементів в покриттях нітриду титану, отриманих методом катодного-дугового осадження / Є.Б. Кашкаров, М.М. Нікітенко, М.С. Сиртанов, А.Н. Сутигіна, Д.В. Гвоздяк // Поверхня. Рентгенівські, синхротронного і нейронні дослідження, 2016. - №6. - с.81-85
- 63.Ryabchikov, AI Development of filtered DC metal plasma ion implantation and coating deposition methods based on high-frequency short-pulsed bias voltage application / AI Ryabchikov, IA Ryabchikov, IB Stepanov // Vacuum. - 2005. - V. 78. - P. 331-336.
- 64.Селіверстов, І.А. Дослідження зносостійкості деталей з покриттями нітриду титану / І.А. Селіверстов, С.Р. Селіверстова // Східно-Європейський журнал передових технологій, 2011. - Т.2., №5 (50). - С.63-64
- 65.Андрєєв, А.А. Закономірності впливу структурного стану вакуумно дугових покриттів TiN на їх стійкість до абразивного зносу / А.А. Андрєєв, О.В. Соболев, І.В. Сердюк, Н.В. Пінчук, А.С. Заметіль, С.В. Федоров, Н.Ю.Черкасов // Тертя і знос, 2014. - Т.35, №6. - с.718-722.
- 66.Тарасенко, Ю.П. Модифікація поверхні ковзання сталеві деталі пари тертя «голка-підп'ятник» / Ю.П. Тарасенко, В.А. Сорокін, Л.А. Кривіна // Матеріали XVII Міжнародної конференції «Фізика міцності і пластичності матеріалів. Самара, 2009. - Т.2. - с.1124-1131.
- 67.Тарасенко, Ю.П. Модифікація поверхні ковзання малогабаритних деталей

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 96 |

- пар тертя методом нанесення TiN-покриття / Ю.П. Тарасенко, В.А. Сорокін, Л.А. Кривіна // Матеріали XLVII Міжнародної конференції «Актуальні проблеми міцності». Нижній Новгород, 2008. - т.2. - с.157-159.
- 68.Тарасенко, Ю.П. Модифікація п'яти цапфи Камнева опори методом нанесення TiN-покриття / Ю.П. Тарасенко, В.А. Сорокін, Л.А. Кривіна //Матеріалознавство і металургія. Збірник наукових праць НГТУ. Нижній Новгород, 2007. - №2. - С.34-40.
- 69.Тарасенко, Ю.П. Поліфункціональні іонно-плазмові покриття нітриду титану в машинобудуванні / Ю.П. Тарасенко, В.Н. Перевезенцев, В.А. Сорокін, І.М. Царьова, Л.А. Кривіна // Збірник наукових праць «Методи зміцнення поверхонь деталей машин», 2008. - 400 с.
- 70.Тарасенко, Ю.П. Модифікація п'яти цапфи Камнева опори методом нанесення TiN-покриття / Ю.П. Тарасенко, І.Н.Царева, Л.А. Кривіна, Е.Н. Раз // Прикладна механіка і технології машинобудування. Збірник наукових праць. Нижній Новгород, 2010. - №2 (17). - с.19-29.
- 71.Тарасенко, Ю.П. Підвищення надійності і ресурсу компресорних лопаток газотурбінних двигунів / Ю.П. Тарасенко, І.М. Царьова, Л.А. Кривіна // Вісник науково-технічного розвитку: Інтернет-журнал, №3 (43), 2011 - 17.01.2011, www.vntr.ru
- 72.Ю.П. Тарасенко Поліфункціональні наноструктуровані покриття нітриду титану для компресорних лопаток ГТД / Ю.П. Тарасенко, І.М. Царьова, Л.А. Кривіна, О.Б. Бердник // Тези доповідей XVIII Міжнародний симпозіум "Динамічні і технологічні проблеми механіки конструкцій і суцільних середовищ" ім. А.Г. Горшкова. Нижній Новгород, 2012 року - с. 35.
- 73.Тарасенко, Ю.П., Вплив умов іонно-плазмового напилення на структуру, механічні та фрикційні властивості покриттів нітриду титану /Ю.П. Тарасенко, І.М. Царьова, І.Г. Романов, Л.А.Кривіна, А.Е. Підлісний // Ел.журнал «Тертя, знос і мастило». С.Петербург, 2000. - Т.2, №1 (2).
- 74.Тарасенко, Ю.П., Дослідження фізико-хімічних і корозійних властивостей

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 97 |

іонно-плазмових покриттів нітриду титану, отриманих при різних парціальних тисках реакційного газу / Ю.П. Тарасенко, І.М. Царьова, Е.А. Федорова, Ю.К. Леваном // Фізика і хімія обробки матеріалів, 2006. - №3. - с.63-67.

75.Овчинников, В.В., боровина Ю.М. Іонна імплантація поверхневих шарів деталей машин / В.В. Овчинников, Ю.М. Боровина // Високі технології в машинобудуванні, 2011. - №6. - С.29-39.

76.Водин, Д.В. Іонна імплантація як перспективний метод підвищення зносостійкості металорізального інструменту / Д.В. Водин // Автоматизовані проектування в машинобудуванні, 2015. - №3. - с. 129-130.

77.Реченко, Д.С. Вплив іонної імплантації на фізико-механічні властивості сталі У8А і фольфрамокабальтових тврдосплавних пластин / Д.С. Реченко, А.Юю Попов, Б.П. Гриценко, А.Р. Сунгатулін, В.П. Калашников, А.А. Єжов // Известия вищих навчальних закладів. Фізика, 2016. - т.59.№9-2. - с.249-251.

78.Моргунов, А.П. Підвищення фізико-механічних властивостей автоматичних кланів поршневих компресорів і Пневмодвигуни методом іонної імплантації / А.П. Моргунов, В.С. Калекін, А.М. Ласиця, В.Г. Чуранкін //Динаміка систем, механізмів і машин, 2007. - № 2. - с. 244-247.

79.Биков, П.В. Вплив іонної імплантації на зміну фізико-хімічних і механічних властивостей металів і сплавів / П.В. Биков, В.Я. Баякін // Збірник: Фізико-технічний інститут Уральського відділення РАН. Матеріали наукових досліджень. Іжевськ, 2012. - с. 89-95.

80.Злобін, В.Н. Використання іонної імплантації в двигунобудування / В.Н. Злобін, І.П. Васильєв, Д.В. Зеляковській // Фундаментальні дослідження, 2015. - №7-4. - с.707-711.

81.Учеваткіна, Н.В. Комбінована технологія підвищення зносостійкості деталей з титанового сплаву ВТ6 на основі іонної імплантації / Н.В.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 98 |

Учеваткіна, В.В. Овчинников, О.А. Жданович, А.Г. Сбітнєв // Зміцнюючі технології та покриття, 2016. - №6 (138) - с. 35-39.

- 82.Петрова, Є.П. Аналіз механізму впливу іонної імплантації на властивості сплавів / Є.П. Петрова, А.П. Бочкарьова // Збірник матеріалів VIII всеросійської конференції молодих вчених. КДТУ ім. Т.Ф. Горбачова, 2016. - С.237.
- 83.Азаренков, Н. А. Наноматеріали, нанопокриття, нанотехнології.Учебное посібник / Н. А. Азаренков, В. М. Береснев, А. Д. Погребняк, Л. В. Маліков, П. В.Турбін. -Х.: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2009. - 209 с.
- 84.Кулигін, Д.А. Іонна імплантація / Д.А. Кулигін // Інноваційна наука, 2017. - №1-2. - с.14-17.
- 85.Діденко, А.Н. «Ефекти дальнього действия» в металах і сплавах при іонній імплантації / О.М. Діденко, Е.В. Козлов, Ю.П. Шаркеев. - Еволюція дефектних структур в металах і сплавах I Міжнародний семінар, 1992. - с.127-128.
- 86.Шаркеев, Ю.П. Дислокаційні структури і зміцнення іонно імплантованих металів і сплавів / Ю.П. Шаркеев, А.Н. Діденко, Е.В. Козлов // відом Вищих навчальних закладів. Фізика, 1994 - №5. - с.92- 108.
- 87.Мартиненко, Ю.В. Ефект дальнього действия при іонній імплантації / Ю.В. Мартиненко // Підсумки науки і техніки. Серія: Пучки заряджених частинок і тверде тіло. М.: ВІНІТІ, 1993. - т.7. - с.82-112.
- 88.Єрофеев, В.І. Вплив акустичних хвиль на процес зміцнення металів високоенергетичними іонними пучками / В.І. Єрофеев, І.Г.Романов, І.Н.Царева // Проблеми машинобудування і надійності машин, 2006. - №2. - с.75-80.
- 89.Васильєва, Е.В. Підвищення зносостійкості сталі ШХ15 іонною імплантацією / Є.В. Васильєва, С.М. Савічева, І.В. Крюкова // Металознавство та термічна обробка металів, 1987. - №1. - С.59-62.
- 90.Глушкова, Д.Б. Підвищення зносостійкості деталей машин методом іонної імплантації / Д.Б. Глушкова, В.П. Тарабанова // Автомобіль і електроніка.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 99 |

Сучасні технології, 2012. - №1 (3). - с.48.

91. Тарасенко, Ю.П. Імплантація іонів С, Zr, Nb, В в поверхню тертя голок / Ю.П. Тарасенко, В.А. Сорокін, Л.А. Кривіна, Ю.А. Дудін // Збірник наукових праць «Прикладна механіка і технології машинобудування» Н.Новгород, 2008. - Ч.2. - с.98-104.
92. Gleiter, H. Nanostructured materials: basic concepts and microstructure // Acta Materialia. - 2000. - Vol. 48, No. 1. - P. 1-29.
93. Головін, Ю. І. Введення в нанотехнологію. - М.: Изд-во «Машинобудування», 2003. - 112 с.
94. Zhou, Y. The effects of triple junctions and grain boundaries on hardness and Yung's modulus in nanostructured Ni-P / Y. Zhou, U. Erb, K.T. Aust, G. Palumbo // Scripta Mater. - 2003. - Vol. 48. - P. 825-838.
95. Валієв, Р. З. Наноструктурні матеріали, отримані інтенсивної пластичної деформацією / Р. З. Валієв, І. В. Александров. - М.: Логос, 2000. - 272 с.
96. Zhang, S. Recent advances of superhard nanocomposite coatings: a review / S. Zhang, D. Sun, Y. Fu, H. Du // Surf. Coat. Tech. - 2003. - 167. - P. 113-119.
97. Тарасенко, Ю.П. Субструктура, механічні та фрикційні властивості іонно-плазмових покриттів нітриду титану, отриманих при різних парціальних тисках азоту / Ю.П. Тарасенко, І.М. Царьова, І.Г. Романов // Известия Академии Наук. Сер. Фізична, 2002. - Т.66. - №8. - с.1223- одна тисячу двісті двадцять п'ять.
98. Мільман, Ю.В. Характеристика пластичності, що отримується при вимірі твердості / Ю.В. Мільман, Б.А. Голанах, С.І. Чугунова. - Київ, 1992. - 25 с.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 21.16115.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 100 |