

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Сумський державний університет

Факультет технічних систем та енергоефективних технологій

Кафедра «Прикладне матеріалознавство та технологія конструкційних матеріалів»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ О. П. Гапонова

«__» _____ 2022 року

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

зі спеціальності 132 «Матеріалознавство»

Тема: «Підвищення експлуатаційних властивостей поверхонь деталей при нанесенні наноструктурованих нітридних покриттів»

Студентка гр. МТ.м-11 _____ Пахненко Д. В.

Керівник _____ Говорун Т. П.

Консультант
з економічної частини _____ Берладір Х. В.

Консультант
з охорони праці _____ Говорун Т. П.

Нормоконтроль _____ Дегула А. І.

Суми 2022

Сумський державний університет
Факультет технічних систем та енергоефективних технологій
Кафедра «Прикладне матеріалознавство та технології конструкційних
матеріалів»
зі спеціальності 132 «Матеріалознавство»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ О. П. Гапонова

«__» _____ 2022 року

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Пахненко Діані Вікторівні

1. Тема проекту (роботи) Підвищення експлуатаційних властивостей
поверхонь деталей при нанесенні наноструктурованих нітридних покриттів
_____ затверджена

наказом по університету від “___” _____ 20__ р. № _____

2. Термін здачі студентом закінченого проекту (роботи) _____

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Матеріали для отримання покриттів за
допомогою магнетронного розпилення з метою зміцнення поверхні виробів

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що їх
належить розробити)

1. Аналіз джерел за темою диплома щодо методів формування покриттів для зміцнення
поверхні

2. Методи наукових досліджень та методика

3. Експериментальні дослідження та загальні результати

4. Економічна частина

5. Охорона праці, довкілля та техніка безпеки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових
креслень)

6. Консультанти з проекту (роботи), із значенням розділів проекту, що їх стосуються

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці, довкілля і техніка безпеки	Говорун Т. П.		
Економічна частина	Берладір Х. В.		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ пор.	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Термін виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Аналіз джерел за темою диплома щодо методів формування покриттів для зміцнення поверхні	Листопад 2022	
2	Методи наукових досліджень та методика	Листопад 2022	
3	Експериментальні дослідження та загальні результати	Листопад 2022	
4	Економічна частина	Листопад 2022	
5	Охорона праці, довкілля, та техніка безпеки	Грудень 2022	

7. Дата видачі завдання _____

Студентка _____
(підпис)

Керівник проекту _____
(підпис)

АНОТАЦІЯ

Пахненко Діана Вікторівна. Підвищення експлуатаційних властивостей поверхонь деталей при нанесенні наноструктурованих нітридних покриттів. – Рукопис.

Робота на здобуття кваліфікації магістра зі спеціальності 132 – Матеріалознавство. – Сумський державний університет, Суми, 2022.

В роботі було досліджено вплив наноструктурованих нітридних покриттів на основі Ti, Ti-Zr, Ti-Al, Ti-Cr, отриманих методом магнетронного розпилення на поверхню деталі, на покращення фізико-хімічних характеристик виробу та здійснення систематичного огляду особливостей нітридних покриттів на основі Ti, Ti-Zr, Ti-Al, Ti-Cr.

Розглянуто фазовий склад покриттів, який залежний від вимог отримання (структури елементів покриття, перебування заготовок деталей у вакуумній камері відносно місця, де проводиться напilenня). Розпізнано структуру та визначено основні властивості наноструктурованих нітридних покриттів.

Охарактеризовано передумови і можливості застосування наноструктурованих нітридних покриттів різного складу, отриманих методом реактивного магнетронного осадження.

Ключові слова: магнетронне розпилення, наноструктуровані нітридні покриття, вакуумні установки, фізичне осадження покриттів

ABSTRACT

Pakhnenko D. V. Increasing the operational properties of the surfaces of parts when applying nanostructured nitride coatings. – The manuscript.

Qualifying paper for obtaining the qualification of master's degree in the specialty 132 – materials science. – Sumy State University, Sumy, 2022.

The paper investigated the influence of nanostructured nitride coatings based on Ti, Ti-Zr, Ti-Al, Ti-Cr, obtained by magnetron sputtering on the surface of the part, on improving the physical and chemical characteristics of the product and carrying out a systematic review of the features of nitride coatings based on Ti, Ti-Zr, Ti-Al, Ti-Cr.

The phase composition of the coatings is considered, which depends on the requirements for obtaining (the structure of the coating elements, the location of the parts blanks in the vacuum chamber relative to the place where sputtering is carried out). The structure and main properties of nanostructured nitride coatings were identified.

The prerequisites and possibilities of using nanostructured nitride coatings of various compositions obtained by the method of reactive magnetron deposition are characterized.

Keywords: magnetron sputtering, nanostructured nitride coatings, vacuum installations, physical deposition of coatings

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра містить в собі 98 сторінок, у тому числі 21 рисуноків, 8 таблиць, бібліографії із 57 джерел на 7 сторінках.

Метою роботи є підвищення експлуатаційних властивостей поверхонь деталей при нанесенні наноструктурованих нітридних покриттів на основі Ti, Ti-Zr, Ti-Al, Ti-Cr, що обумовлено необхідністю отримання покриттів з різноманітною структурою і оптимальними властивостями для роботи виробів у певних умовах; вивчення впливу структурних характеристик компонентів нітридних покриттів на фізико-механічні характеристики покриттів.

Об'єкт дослідження – наноструктуровані нітридні покриття на основі Ti, Ti-Zr, Ti-Al, Ti-Cr, що отримані методом магнетронного осадження.

Предмет дослідження – фазовий склад, структура та властивості нітридних покриттів на основі Ti, Ti-Zr, Ti-Al, Ti-Cr, отриманих методом магнетронного осадження.

Методи дослідження. Методи експериментально-теоретичного рівня; методи отримання покриттів за допомогою фізичного осадження у вакуумі – магнетронного розпилення; механічне оброблення; дослідження поверхні нітридних покриттів, отриманих за допомогою методів магнетронного осадження – електронна та атомно-силова мікроскопія, рентгеноструктурний аналіз.

Наукова новизна. Дослідження впливу наноструктурованих нітридних покриттів на основі Ti, Ti-Zr, Ti-Al, Ti-Cr, отриманих методом магнетронного розпилення на поверхню деталі, на покращення фізико-хімічних характеристик виробу та здійснення систематичного огляду особливостей нітридних покриттів на основі Ti, Ti-Zr, Ti-Al, Ti-Cr, отриманих методом магнетронного розпилення.

Ключові слова: магнетронне розпилення, наноструктуровані нітридні покриття, вакуумні установки, фізичне осадження покриттів

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ.....	9
ВСТУП.....	10
РОЗДІЛ 1.....	15
АНАЛІЗ ДЖЕРЕЛ ЗА ТЕМОЮ ДИПЛОМА ЩОДО МЕТОДІВ ФОРМУВАННЯ ПОКРИТТІВ ДЛЯ ЗМІЦНЕННЯ ПОВЕРХНІ.....	15
1.1 Актальність методів поверхневого зміцнення.....	15
1.2 Класифікація методів зміцнення поверхні.....	16
1.3 Вакуумні методи отримання покриттів і їх коротка характеристика.....	21
1.3.1 Радіочастотне магнетронне напилення.....	22
1.3.2 Зміцнення поверхні іонно-променевим методом.....	23
1.3.3 Вакуумний плазмово-дуговий метод.....	24
1.3.4 Метод іонно-плазмового розпилення.....	25
1.3.5 Термічне напилення у газовому розряді.....	26
1.4 Характеристики і властивості покриттів, отриманих методом фізичного осадження з парової фази (PVD).....	27
1.5 Вплив наноструктурованих нітридних покриттів на підвищення експлуатаційних властивостей поверхонь деталей і виробів.....	30
1.6 Дослідження багатошарових, багатокомпонентних і комбінованих покриттів.....	34
Висновки.....	41
РОЗДІЛ 2.....	42
МЕТОДИ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА МЕТОДИКА.....	42
2.1 Закономірності створення наноструктурованих покриттів на основі нітридів, отримуваних вакуумно-дуговим магнетронним осадженням.....	42
2.1.1 Нанокристалічні покриття.....	43
2.1.2 Наноструктура нанокомпозитів.....	44
2.1.3 Покриття з нанокристалічною структурою. Наноструктуровані багатошарові композитні покриття.....	45
2.2 Метод магнетронного розпилення і його основні характеристики.....	48
2.3 Умови проведення експерименту.....	51
2.4 Методи дослідження структури і властивостей покриттів.....	51
2.4.1 Метод скануючої (растрової) електронної мікроскопії.....	51
2.4.2 Рентгенофазовий аналіз.....	53
2.4.3 Просвічувальна електронна мікроскопія.....	54
2.4.4 Метод атомно-силової мікроскопії.....	55
Висновки.....	56

РОЗДІЛ 3	57
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ	57
3.1 Основні вимоги до покриттів	57
3.2 Характеристика і різновиди матеріалів покриттів	58
3.2.1 Однокомпонентні покриття.....	62
3.2.2 Покриття складної структури	64
3.2.3 Переваги багатокомпонентних покриттів над однокомпонентними	67
3.2.4 Багатошарові композиційні покриття	68
3.3 Результати експериментальних досліджень покриттів.....	69
3.3.1 Структурні та рентгеноструктурні дослідження покриттів TiN.....	69
3.3.2 Будова та морфологічні особливості покриттів на основі багатокомпонентних нітридів титану, легованих цирконієм та алюмінієм Ti-Zr-N та Ti-Al-N.....	72
3.3.3 Результати дослідження наноструктурованих комплексних покриттів (TiCr)N.....	76
3.3.4 Осадження багатошарових покриттів з шарами нанометричної товщини.....	77
3.3.5 Дослідження зносу та тертя покриттів на основі TiN.....	79
3.3.6 Узагальнення результатів по дослідженим покриттям	81
Висновки	82
РОЗДІЛ 4	84
ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	84
4.1 Стан економічних можливостей та прогнозованості реалізації пізнавального експерименту з погляду ресурсозбереження.....	84
4.2 Ініціація проекту та економічні розрахунки	84
Висновки	89
РОЗДІЛ 5	90
ОХОРОНА ПРАЦІ, ДОВКІЛЛЯ І ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ	90
5.1 Основні види небезпек при роботі на вакуумних установках	90
5.2 Загальні вимоги безпеки при експлуатації електроустаткування та вакуумних насосів	91
5.3 Заходи поліпшення умов праці обслуговуючого персоналу	92
5.4 Контроль стану навколишнього середовища і засоби з охорони довкілля.....	94
Висновки	96
ВИСНОВКИ	97
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	99

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

МР – магнетронне розпилення

НП – нітридні покриття

КМ – композитні матеріали

КП – композитні покриття

БКП – багатошарові композиційні покриття

РЕМ – растрова електронна мікроскопія

МОР – мастильно-охолоджувальна рідина

ТО – термічна обробка

УЕ – умови експлуатації

ТЕМ – трансмісійний електронний мікроскоп

ЗІЗ – засоби індивідуального захисту

ВСТУП

Підвищена твердість, термін служби, стійкість до зношування і окислення під впливом високих температур входять до списку найбільш необхідних властивостей, якими повинні володіти матеріали. Тому питання підвищення корозійної стійкості та зносостійкості деталей машин та механізмів вирішується покращенням властивостей робочих поверхонь.

З цієї точки зору найбільш вигідний спосіб задовольнити всі вимоги – це створення на поверхні тонкого покриття з потрібними характеристиками відповідно до матеріалом виробу, яке захищає останній від руйнування при експлуатації в екстремальних умовах.

Актуальним вважається ставлення в нинішньому матеріалознавстві до зміни поверхні діючих компонентів, ціллю якого є надання деталі інноваційної системи експлуатаційних та фізико-механічних характеристик. Даний спосіб утворення покриттів з нітридів матеріалів використовується в різних сферах зміцнення поверхонь деталей, оскільки вони продовжує їх термін експлуатації, надійність і довговічність.

Реактивне магнетронне розпилення дає добрі механічні властивості, такі як має низьку температурну провідність, стійкість до корозії, зносостійкість і високу твердість. Нітридне покриття дають кращий результат на крихких матеріалах, оскільки покращують їх ерозію опір [1].

Важливим з шляхів посилення вивіреності та довгочасності деталей є одержання заданих особливостей поверхонь на завершальних діях, зокрема методами поверхневого зміцнення. Технологічні перспективи методів підвищення експлуатаційних характеристик деталей відносяться до числа найсучасніших і найперспективніших шляхів зміцнення деталей машин.

Актуальними вважаються дослідження, які орієнтовані на вдосконалення визначних і опрацьовування новітніх високоефективних методів зміцнення деталей машин, які б надавали великий ступінь їх експлуатаційних ознак.

Питання про ідею підвищення експлуатаційних характеристик деталей хвилювало і до тепер продовжує привертати увагу багатьох дослідників, таких як: Хільчевський В. В., Усов А. В., Погребна Н. Е., Куцова В. З. [2-3].

У науковій роботі [1] досліджували наноструктуроване покриття, де говорилося про покращення властивостей металу, у яких досліджуються матеріали покриття за різними параметрами та їх вплив на властивості металу. Завдяки кращій стійкості до ерозії, міцності та зносостійкості, потреба в нітридному базовому покритті рекомендується для лакофарбової промисловості. Нітридне покриття рекомендується завдяки гарній зносостійкості та корозійної стійкості. Процес напилення є ефективним методом мікроструктурного та трибологічного аналізу.

Різні підходи щодо покращення поверхонь деталей при нанесенні покриттів відбиті у багатьох дослідженнях. Проблема підвищення експлуатаційних характеристик деталей є актуальною і потребує вивчення і розробки на рівні науково-теоретичних і практичних досліджень.

Завжди актуальним є питання якості інструменту, його поверхні та вдосконаленні методів щодо підвищення зносостійкості, і зміні характеру при терті. Метал проходить гальванічну обробку, в результаті якої відбуваються реакції, в ході яких чиниться опір корозії, покращується зносостійкість, теплопровідність та інші властивості. Щоб заощадити на виготовленні виробів можна покращити якість поверхні, замінивши дорого вартісні матеріали дешевшими, але не менш зносостійкими.

Композитні порошки Ni/Al-TiB₂, отримані методом кульового подрібнення, були успішно нанесені на поверхню підкладки з нержавіючої сталі 316L методом холодного напилення при температурі газу 250 і 450 °C. Завдяки зміцненню частинок TiB₂ мікротвердість покриттів Ni/Al-TiB₂ була вище, ніж у покриттів Ni/Al [4].

Мікротвердість покриттів збільшувалася в міру розпилення підвищилася температура газу. Аналізуючи мікроструктуру відпалених покриттів, фаза Al поступово зменшувалася, відбувалася реакція дифузії.

Далі частинки TiV_2 змінилися від порівняльних більше розподіл до накопичення в покритті за рахунок безперервного утворення і зростання.

Проблема дослідження сучасних методів підвищення експлуатаційних характеристик деталей нині дуже актуальна. Великий попит піднятої проблеми викликаний потребою спеціалістів в методах вдосконалення покращення поверхонь для поліпшення характеристик деталей, і в цілому якості. З даної причини ми вирішили обрати темою нашого дослідження: «Підвищення експлуатаційних властивостей поверхонь деталей при нанесенні наноструктурованих нітридних покриттів». **Це визначає актуальність досліджень.**

Нанесення плазмових покриттів диференційованого хімічного складу із заздалегідь заданими фізико-механічними властивостями та структурою допускає модифікувати поверхню деталей, переінакшуючи їх теплові, антикорозійні, зносостійкі та інші параметри. Тому постає питання розробки і проектування технологічного процесу отримання плазмових покриттів, щоб не було тріщини, сколів та інших пошкоджень нанесеного покриття від поверхні деталі. Врахування структурних характеристик плазмових покриттів, їх пористості, міцності зчеплення покриття з основою важливе, щоб підвищити якість та ефективність шліфувального процесу [3].

Метою роботи є підвищення експлуатаційних властивостей поверхонь деталей при нанесенні наноструктурованих нітридних покриттів на основі Ti , $Ti-Zr$, $Ti-Al$, $Ti-Cr$, що обумовлено необхідністю отримання покриттів з різноманітною структурою і оптимальними властивостями для роботи виробів у певних умовах; вивчення впливу структурних характеристик компонентів нітридних покриттів на фізико-механічні характеристики покриттів.

Для досягнення заданої мети в дослідженні було виявлено та поставлено **такі задачі:**

1. Провести аналітичний огляд джерел літератури відносно різновидів, отримання і характеристик наноструктурованих нітридних покриттів.

2. Реалізувати експеримент по отриманню наноструктурованих нітридних покриттів різного складу методом реактивного магнетронного осадження.

3. Розглянути фазовий склад покриттів, нанесених методом магнетронного осадження, який залежний від вимог отримання (структури елементів покриття, перебування заготовок деталей у вакуумній камері відносно місця, де проводиться напилення).

4. Розпізнати і охарактеризувати структуру та визначити основні властивості наноструктурованих нітридних покриттів.

5. Охарактеризувати передумови і можливості застосування наноструктурованих нітридних покриттів різного складу, отриманих методом реактивного магнетронного осадження.

Об'єкт дослідження – наноструктуровані нітридні покриття на основі Ti, Ti-Zr, Ti-Al, Ti-Cr, що отримані методом магнетронного осадження.

Предмет дослідження – фазовий склад, структура та властивості нітридних покриттів на основі Ti, Ti-Zr, Ti-Al, Ti-Cr, отриманих методом магнетронного осадження.

Методи дослідження. Методи експериментально-теоретичного рівня; методи отримання покриттів за допомогою фізичного осадження у вакуумі – магнетронного розпилення; механічне оброблення; дослідження поверхні нітридних покриттів, отриманих за допомогою методів магнетронного осадження – електронна та атомно-силова мікроскопія, рентгеноструктурний аналіз.

Способом магнетронного осадження було сформовано наноструктуровані нітридні покриття. Дослідження нітридних покриттів методом магнетронного розпилення на поверхню деталі здійснювалося для покращення фізико-хімічних характеристик деталей, на які ці покриття наносяться. Здійснено систематичний розгляд і аналіз особливостей нітридних покриттів, отриманих методом магнетронного розпилення. Якісне захисне покриття себе зарекомендувало саме на основі нітриду хрому, тому має гарні

хімічні та механічні властивості, тому зараз широко використовується на виробництві.

Наукова новизна. Дослідження впливу наноструктурованих нітридних пориттів на основі Ti, Ti-Zr, Ti-Al, Ti-Cr, отриманих методом магнетронного розпилення на поверхню деталі, на покращення фізико-хімічних характеристик виробу та здійснення систематичного огляду особливостей нітридних покриттів на основі Ti, Ti-Zr, Ti-Al, Ti-Cr, отриманих методом магнетронного розпилення.

Особистий внесок здобувача полягає в аргументуванні та постановці задач досліджень, вирішенні загальних завдань експерименту, розгляду і розтлумаченні досліджуваних результатів, опрацюванні інформації і її оформленні.

Публікації. Тези конференції.

Структура й обсяг кваліфікаційної роботи магістра. Робота складається із вступу, п'яти розділів, списку використаних джерел. Повний обсяг кваліфікаційної роботи магістра становить 98 сторінок, у тому числі 21 рисуноків, 8 таблиць, бібліографії із 57 джерел на 7 сторінках.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ДЖЕРЕЛ ЗА ТЕМОЮ ДИПЛОМА ЩОДО МЕТОДІВ ФОРМУВАННЯ ПОКРИТТІВ ДЛЯ ЗМІЦНЕННЯ ПОВЕРХНІ

1.1 Актальність методів поверхневого зміцнення

Підвищення ефективності виробів та продуктивності металообробної промисловості, а також розробки нових інструментальних матеріалів для покращення якості та зносостійкості покриттів дуже важливе в наш час. Підвищена твердість, термін служби, стійкість до зношування і окислення під впливом високих температур входять до списку найбільш необхідних властивостей, якими повинні володіти такі матеріали.

Збільшення супротиву деталей до виходження з ладу окремих типів обслуговування в умовах експлуатації надають завдяки інноваційним методам зміцнення поверхні деталей. Для виготовлення деталей високої міцності використовують сплави, сталі та КМ.

З цієї точки зору найбільш вигідний спосіб задовольнити всі вимоги – це створення на поверхні тонкого покриття з потрібними характеристиками з матеріалом виробу, що захищає останній від руйнування при експлуатації в екстремальних умовах.

Вважається діяльним напрямком підвищення випробуваності деталей машин одержання заданих характеристик поверхонь способами поверхневого зміцнення. Новітні технологічні процеси зміцнення допомагають правити даними високого рівня, систематизацією вимірів поверхонь.

Переважно закінчення терміну придатності деталей машин, тому передчасна поломка в умовах експлуатації є результатом процесів, які здійснюються у поверхневих прошарках деталей, точніше: зношування та тертя, поділ рештків напружень, а також їх велика централізація, утворення мікротріщин.

Усунення негативних впливів значно збільшує якість поверхонь, втомну міцність, корозійну стійкість, зносостійкість. Поліпшення даних поверхневих шарів може бути способом покращення конструкцій, використанням якісних матеріалів, з удосконаленими механічними властивостями, створення перспективних процесів зміцнення поверхонь деталей.

Деталям, що зазнають погіршення характеристик з самої поверхні виробу, опрацьовано значно багато шляхів покращення характеристик поверхні, що базується на нанесенні покриття, чи зміні структури поверхневого шару, що може траплятися змінивши або ж хімічну будову поверхні.

Якщо хімічна будова змінюється, покращення характеристик виробів отримують способом осаджування компонентів, що мають свої особливості та виокремлюються від загального металу деталі, а також краще відгукуються вимогами до зберігання та обслуговування. В ході реакції зміни структури поверхні здійснюється фізико-хімічне трансформування в сплаві, що збільшує його спротив до виходження з ладу [5].

1.2 Класифікація методів зміцнення поверхні

До теперішнього часу було створено безліч методів, які б сприяли поліпшенню характеристик поверхонь деталей машин. Однією з таких є класифікація методів зміцнення поверхні, яка наведена у схемі на рисунку 1.1.

Дана група методів охоплює в собі: методи з утворенням плівки на поверхні; методи зі зміною структури поверхневого шару; методи зі зміною хімічного складу поверхневого шару; методи зі зміною енергетичного складу поверхневого шару; методи зі зміною шорсткості поверхні; методи зі зміною структури у всьому об'ємі металу.

До методів зі зміною структури у всьому об'ємі металу відносять криогенне оброблення та ТО при плюсових температурах. Криогенною

обробка дає покращення механічних характеристик інструментів, підвищення їх твердості, зносостійкості, а ще міцності деталей, зроблених із високо-вуглецевих та легуваних конструкційних сталей. Значно покращується якість поверхонь, що підлягають поліруванню або доведенню, що означає присутність в'язкого аустенітного поля в композиції верхнього шару не дозволяє створенню дзеркальної гомогенної поверхні [6].

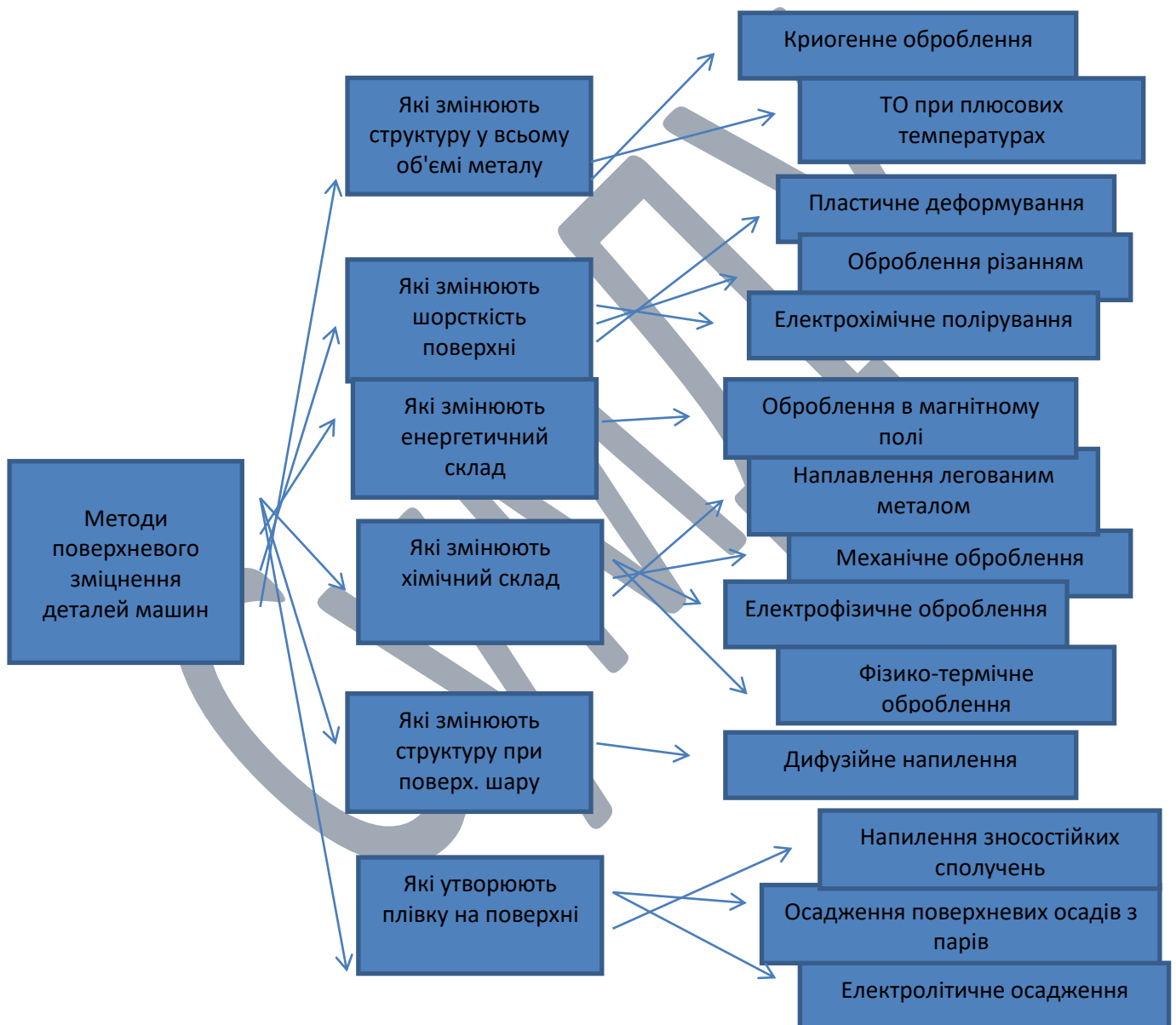


Рисунок 1.1 – Класифікація методів поверхневого зміцнення деталей машин [6]

Оцінюючи значущість використання криогенної обробки сталі слід брати до уваги дані особливості: зроблене вдруге охолодження загартованої сталі погіршує її характеристики у тому разі, якщо не опускається температура нижче, чим при загартуванні; час витримки при заперечній температурі не позначається на результатах обробки; великі зміни у структурі під дією криогенних температур діють у сталях з вмістом більше норми залишкового аустеніту; основа зміни параметрів деталі в процесі аустенітно-мартенситних трансформувальнь потрібно окреслити дослідним шляхом для точного хімічного складу сталі.

Оброблюючи деталь незвичайної форми з неоднаковим розділенням ваги слід терміново загартувавши, використати відпустку для того, щоб зняти загартовану напругу; охолодження нижче нуля в результаті загартування посилює ймовірність виникнення тріщин та напругу; дана обробка призводить до зростання об'єму композиційних компонентів внаслідок розпаду залишкового аустеніту. У таблиці 1.1 вказані середні коефіцієнти розширення аустенітно-мартенситних фаз сталі.

Таблиця 1.1

Середній коефіцієнт розширення [6]

Структура сталі	Коефіцієнт розширення, С`	
	$\alpha \cdot 10^6$	$\beta \cdot 10^6$
Мартенсит	11,5	35,0
Аустеніт	23,0	70,0

ТО при плюсових температурах допомагає виготовляти матеріали з потрібними заданими властивостями за допомогою великої різноманітності технічних процесів. Відбувається легування верхнього шару деталей азотом хромом, вуглецем з термічною обробкою для покращення якості поверхні [2].

До методів зі зміною шорсткості поверхні відносять пластичне деформування, оброблення різанням та електрохімічне полірування.

Пластичне деформування покращує характеристики матеріалів, за якої в результаті утворюється пружно-пластична зміна верхнього прошарку виробу, який не має в собі стружки. Даний метод має згладжені мікронерівності, підвищену твердість, напруження стиску в поверхневому шарі, які є залишковими. В результаті цього покращуються механічні властивості: зносостійкість стає кращою, також втомна міцність, корозійна стійкість.

Оброблення різанням допомагає утворити задану поверхню за допомогою різального інструменту, яка отримується внаслідок відслоєнки верхніх шарів матеріалу, викидаючи зайву стружку. А електрохімічне полірування вважається механічною обробкою матеріалів (полірування, шліфування), які є електропровідними, але в порівнянні з іншими є менш затратними. Краще обробляти даними методами важкооброблювані та напівпровідникові матеріали: тверді сплави, високолеговані жароміцні і магнієві сплави [7].

До методів зі зміною енергетичного складу поверхневого шару відноситься оброблення в магнітному полі. Його особливість полягає в обробці магнітним полем, яке дає змогу зменшити напрути в деталях, підвищити зносостійкість і довговічність конструкцій.

Методи, які вважаються новітніми та сучасними в імпульсній магнітній обробці наступні:

- ті, що збільшують амплітуди імпульсу. Використовують для того, щоб обірвати силкування у виробках, що виконують роботу при ударних навантаженнях;

- ті, що обертають деталі в соленоїдах. Використовують для того, щоб зняти силкування в місцях, де зварювалися різні матеріали;

- обертовим магнітним полем. Використовують для підвищення довговічності завершених деталей та виробів;

- холодом і імпульсним магнітним впливом. Використовують для того, щоб зміцнити окремі деталі, що виконують роботу при низьких температурах;

- імпульсна магнітна обробка у вакуумі із використанням захисних покриттів, якими зміцнюють деталі, що виконують роботу в вакуумі;
- ТО металів в магнітному полі [8].

Методи зі зміною хімічного складу поверхневого шару розділені на наплавлення легованим металом, механічне оброблення, електрофізичне оброблення та фізико-термічне оброблення. Наплавлення легованим металом на поверхню виробу змінює його характеристики.

В окремих ситуаціях при наплавці слід систематично роз'яснювати постійні питання: правильно обрати матеріал, що надає доцільність умовам експлуатаційних властивостей; поле наплавлення даного матеріалу на провідний метал деталі виробу чи добір матеріалу для наплавлення підшару [8]. МО заготовок із різноманітних з метою вироблення деталей параметрами, які були вказані чи заготовки для наступних технологічних операцій.

До методів зі зміною структури поверхневого шару відносять дифузійне напилення. Він означає варіювання різних особливостей поверхні деталей способом нанесення на поверхню металу. Це вид хіміко-термічної обробки, де молекули і атоми змішуються рівномірно у різних речовинах, таким чином наповнюється поверхня металу, що дає кращий зовнішній вигляд, а саме блиск, має підвищену корозійну стійкість, твердість, міцність та інші характеристики.

Методи з утворення плівки на поверхні містить напилення зносостійких сполучень, осадження поверхневих осадків з парів та електролітичне осадження. Напилення зносостійких поверхонь відбувається детонаційним напиленням, плазмовим напиленням порошкових матеріалів, лазерним напиленням. Електролітичне осадження відбувається нікелюванням, боруванням, хромуванням, електрофорезом, нікель фосфатуванням. А осадження з пари відбувається за допомогою електронно-променевого випаровування, термічного випаровування тугоплавких сполук, електронно-хімічного випаровування [9].

1.3 Вакуумні методи отримання покриттів і їх коротка характеристика

Вакуумне напилення має три етапи: 1 – утворення розпиленних частинок; 2 – створення потоку і переміщення напилених частинок до поверхні; 3 – конденсація пари і утворення покриття на поверхні основи. Щоб мати покриття високої якості, потрібно створювати кращі умови їх витікання за допомогою вакуумного нанесення, яке зображено на рисунку 1.2 [10].

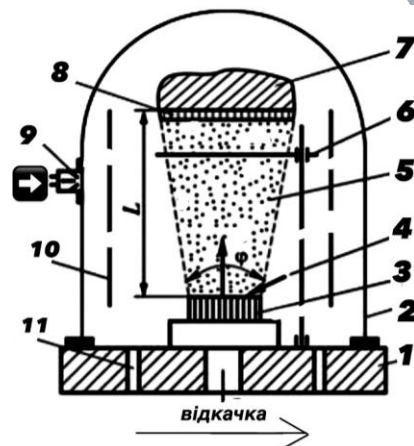


Рисунок 1.2 – Вакуумне нанесення покриттів: 1 - базова плита; 2 - робоча камера; 3 – матеріал, що розпилюється (випаровується); 4 - підведення енергії; 5 - потік розпиленних частинок; 6 - заслінка; 7 – виріб, що напилюється; 8 - покриття; 9 - натікач; 10 – екрани [10]

Вакуумні методи показали, що вони можуть надавати якісний рівень фізико-механічних характеристик матеріалів на поверхнях деталей, дають змогу наносити густі покриття з тугоплавких хімічних поєднань, а ще алмазоподібних, які звичайними методами не вдається одержати. Вони гарантують високе зчеплення покриття до підкладки, в результаті дають рівномірні покриття без дефектів та нерівних пропорцій, поверхня покриття забезпечена високою чистотою, що екологічно важливо для виробництва.

Основними вакуумними методами утворення НП є: магнетронне розпилення (осадження) [11], іонно-променевий метод [12], вакуумний

плазмово-дуговий метод [13], метод іонно-плазмового розпилення [14], термічне напилення у газовому розряді [15].

1.3.1 Радіочастотне магнетронне напилення

Тонкоплівкові покриття з високоентропійного сплаву набули популярності в інженерії поверхонь завдяки своїм відмінним фізичним, механічним і електрохімічним властивостям. Декілька факторів впливають на щільність і мікроструктуру тонкоплівкового покриття, але найбільш помітним є енергія компонентів, що впливають на підкладку, тому процес осадження має вирішальне значення.

Мікроструктура тонкоплівкових покриттів може суттєво впливати на твердість, зносостійкість, міцність, стійкість до корозії та поведінку при високих/низьких температурах. При магнетронному розпиленні плазма може підтримуватися в камері під нижчим тиском, тому відбувається менше зіткнень іонізованих газів, а покриття наноситься ефективніше.

Для порівняння, процес нанесення покриттів високопотужним імпульсним магнетронним напиленням створює набагато щільніші, твердіші та гладкіші покриття, ніж звичайні методи осадження тонких плівок. У цьому дослідженні для нанесення тонкоплівкових покриттів $Al_{0,5}CoCrFeNi_2Ti_{0,5}$ HEA використовували радіочастотне магнетронне розпилення та HiPIMS [16].

Покриття представляли FCC структуру з переважною орієнтацією, а їх поверхні змінювалися від вузликової до тонкої мікроструктури. Розміри кристалітів і шорсткість поверхні зменшилися до 13,27 і 1,33 нм, відповідно, на основі FWHM і AFM аналізів. Нижчий робочий тиск був сприятливим для отримання покриттів з хорошими властивостями. Крім того, тонкоплівкові покриття $Al_{0,5}CoCrFeNi_2Ti_{0,5}$ HEA покращили корозійну стійкість підкладки. Таким чином, процеси HiPIMS і магнетронного напилення дозволяють краще контролювати властивості тонкоплівкових покриттів $Al_{0,5}CoCrFeNi_2Ti_{0,5}$, підвищуючи їх потенційне використання в екстремальних умовах [16].

Ротаційне хрестоподібне радіочастотне магнетронне джерело було розроблено, включаючи чотири секторні розряди магнетронного розпилення для рівномірного використання мішені. Радіус Лармора та параметр Холла електронів є шляхом розгляду $E \times B$ дрейфового руху електронів із використанням імітованих профілів магнітного поля, де електричне поле E вертикальне до цілі, а магнітне поле B паралельне цілі [17].

Часові еволюції струму насичення іонів, як вимірювання потоку іонів до мішені, вимірюються зондом Ленгмюра на фіксованій осьовій відстані 5 мм від мішені та в різних радіальних положеннях. Виявлено, що зміна часу I_{is} у кожному радіальному положенні отримана згідно з прогнозами розряду хрестоподібного магнетронного розпилення. Усереднений за часом профіль струму насичення іонів до мішені добре узгоджується з профілем ерозії мішені. Досягнуто максимального цільового використання 78,0% [17].

1.3.2 Зміцнення поверхні іонно-променеви́м методом

Плазма з низькою температурою у вакуумі породжує безліч неприємностей. Зростаюча плівка проходить самоплинну обробку. Проваджуючись кораченням скріплення покриттів, вона може завдати негативних результатів – трансформуються оптичні властивості покриттів і їх електричні виміри. В той же час високоенергетичні елементи бомбардують частинки всередині камерного устаткування, задаючи десорбцію адсорбованих газів і розпилення їх приповерхневого шару, в результаті чого вибруднюються плівки і погіршується якість.

Для того, щоб прибрати дані дефекти важливе скористання методом іонно-променевого розпилення. Його суть в розпиленні поверхні матеріалу в умовах високого вакууму під дією пучка іонів певної енергії. Збудження електричного заряду відбувається між анодом і катодом.

Магнітне поле, що в гарматі, відводить електрони від напрямку під дією електричного поля, збільшуючи їх напрямкою і також ймовірність суїечки з молекулами газу. Система зосередження дає змогу отримувати

моноенергетичний пучок іонів аргону. Щоб послабити промінь і застережити створення позитивного заряду при бомбардуванні ослабленої мішені утвердиться основа низькоенергетичних електронів [10].

1.3.3 Вакуумний плазово-дуговий метод

Плазма – це газоподібне середовище, яке містить достатню кількість іонів і електронів, щоб бути хорошим провідником електрики. У плазмі обробки PVD ступінь іонізації низький, тому газоподібних нейтралів набагато більше, ніж іонів. Електрони та іони втрачаються з плазми на поверхні. За умов рівноваги утворюється така ж кількість іонізованих молекул, скільки втрачається з плазми. За наявності поверхонь, електродів або електричних полів плазма може не бути об'ємно нейтральною поблизу них.

При створенні та підтримці плазми енергія передається електронам за допомогою електричного поля, а енергійні електрони створюють іонізацію за рахунок електрон-атомного удару. У більшості випадків плазової обробки поверхня, що обробляється, знаходиться в області генерації плазми. В інших випадках бажано виробляти плазму в джерелі плазми та обробляти поверхню подалі від області генерації плазми. Ці джерела плазми можуть забезпечувати іони для бомбардування мішені розпилення при осадженні розпиленням або зростаючої плівки при іонному покритті. Вони можуть забезпечувати активовані газоподібні види, необхідні для процесів реактивного осадження, або можуть забезпечувати дисоціацію попередників хімічної пари для забезпечення осадження з пари [18].

Плазово-дуговий метод характеризується переплавом, який утворюється в місці електричної дуги під функціонуванням високої температури, що вогнить поміж електродом і піддоном кристалізатора у вакуумі, метал розплавляється, тому частинки потрапляють у вакуум. В цій ємності, яка охолоджувалась водою, утворюється злиток. Електрод може і переплавлятися, і навпаки. Дана установка проходить у вакуумі до того, як

почне плавитися, а потім вакуумна система виконує роботу впродовж всієї плавки. Можна пояснити це тим, що краплі металу потрапляють в розтавний сплав, через розчинений простір [19].

Ефект розплаву у охолоджуючому водою кристалізаторі «носить» чіткий спрямований характер - подовж руху тепловідведення. Внаслідок такого переплаву покращуються механічні характеристики деталей.

Отже, одержання даних покриттів трапляється через згущення плазмового плинину, який формується за допомогою вакуумної дуги в азоті. Контролюючи енергію і запас плинину, що утворюється з плазми дуги, можливо переінакшувати фазовий стан, характеристики покриттів, будову, а також одержувати покриття з очищених металів, їх багат шарових композицій і твердих сплавів.

1.3.4 Метод іонно-плазмового розпилення

За практикою у використанні популярні такі схеми, які різняться обставинами формування плазми тліючого розряду: магнетронна, діодна і тріодна (рис. 1.3) [10].

Діодна схема має катод і анод, які розміщені на декілька сантиметрів між собою у вакуумній камері. Вона є найпростішою серед всіх схем. Дія відбувається через низьку результативність іонізації описується низькою швидкістю розпилення. Вторинні електрони атакують поверхню деталі, внаслідок чого виникає перегрів. Шляхи покращення продуктивності іонізації створені на збільшенні часу пошуку електронів в міжелектродному проміжку і за рахунок використання низьковольтних електричних розрядів [20].

Тріодна схема має додаткову катушку, катод і анод, які утворюють генератор плазми, самостійний від матеріалу, що розпилюється, тому можна керувати прискорюючою напругою. Деталь, на яку лягає покриття, міститься поруч з плазмою або всередині неї. Напруга, що впливає на катод, не впливає на розряд, що виробляє плазму [10].

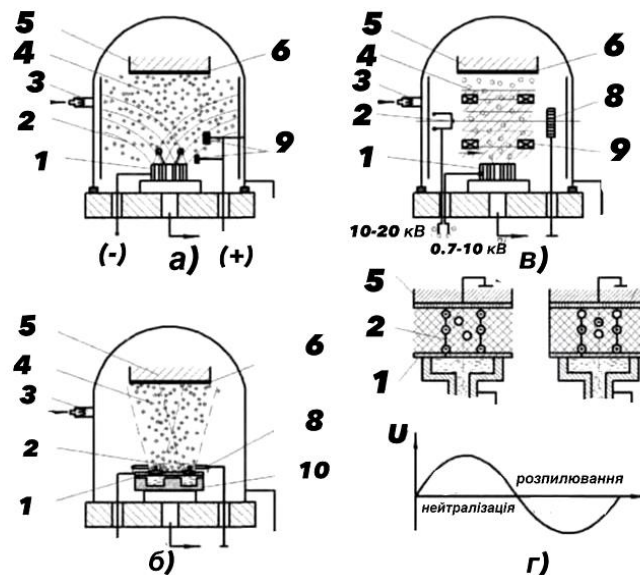


Рисунок 1.3 – Схеми нанесення покриттів іонно-плазмовим розпиленням: а – діодна схема; б – тріодна схема; в – магнетронна схема; 1 – матеріал, що розпилюється (катод); 2 - тліючий розряд; 3 - натікач; 4 - потік розпиленних частинок; 5 – деталь, що напилюється; 6 - покриття; 7 - гарячий катод; 8 - анод; 9 - магнітна катушка; 10 - постійні магніти [10]

Магнетронна схема також відбувається у вакуумі, де розпилюється тверда ціль напилюваного матеріалу іонами інертного газу, що формуються в плазмі аномального тліючого розряду, накладаючи на нього магнітне поле. Електричне поле і тліючий заряд збуджується внаслідок подачі сталої напруги між мішенню і анодом [10].

Стрімкість розпилення характеризується теплопровідністю матеріалу мішені, вимогами осадження матеріалу катода, яке виконується водою, в результаті чого знешкоджує нагрів і оплавлення. Отже, магнетронне розпилення може напилювати покриття диференційні поверхні деталей [10].

1.3.5 Термічне напилення у газовому розряді

Даний метод допомагає виконати поверхневу обробку за допомогою покриття, яке утворюється шляхом розпилення частинок за допомогою нагріву. Це напилення має декілька стадій: випаровування матерії з цілью одержання паро-атомарного плинну; переведення пару в вакуумі; згущення

пари на підніжжі з формуванням структури плівки. Цей метод має гарну продуктивність та високу швидкість осадження.

Саме за допомогою термічного напилення можна шляхом відновлення повернути пошкодження зношуванням деталі до початкових розмірів. Також збільшується термін придатності в декілька разів, покращуються експлуатаційні характеристики. Якщо раніше функції погіршуються з часом використання, і старі деталі просто заміняли новими, то за допомогою цього методу тепер можна відновити розміри і задані характеристики способом термічного напилення, що дає змогу скоротити розходи на професійно-технічний сервіс.

Отже, цей метод здійснюється на несправні деталі для того, щоб повернути розміри за допомогою термічного напилення спеціальних матеріалів, наприклад, хромових чи нікелевих сплавів, і в результаті покращити характеристики деталі: підвищується зносостійкість, зменшується собівартість [14].

1.4 Характеристики і властивості покриттів, отриманих методом фізичного осадження з парової фази (PVD)

У роботі [21] досліджено особливості структуроутворення твердих покриттів, здобутих іонно-променевим легуванням, хіміко-термічною обробкою, нанесенням вуглецевих подібних на алмазні покриття на поверхні розбіжних конструкційних та функціональних матеріалів. Нові методи проведення зміцнюючої обробки допускають зміну поверхні, даючи потрібний фазовий склад, властивості міцності. Межі розподілу покриття є основоположенням, що суттєво змінює вчення руйнування матеріалу при терті.

Досліджуючи нанорозмірну архітектуру покриттів ZrN/CrN [22]: мікроструктуру, склад, механічні властивості використовували метод фізичного осадження з парової фази (PVD) із катодною дугою був повністю застосований до нержавіючої сталі AISI 304 зразків для осадження наносферів

ZrN/CrN, що мають високу щільність і адгезію. Хімічний склад досліджували методом енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії.

Електрохімічну характеристику проводили методом потенціодинаміки поляризаційної та електрохімічної спектроскопії. Електрохімічні випробування показали, що корозійна стійкість наночарів ZrN/CrN посилюється при збільшенні кількості двошарових періодів, які можна приписати зменшенню точкових отворів і блокуванню шляху проникнення корозійного розчину [22].

У своїй роботі [23] Погребняк А. Д. та інші науковці досліджували нітридні покриття (TiHfZrVNb)N, які були виготовлені методом катодного дугового осадження за різних умов осадження. Досліджено склад, кристалічну структуру, деформований напружений стан, профілі дефектів і атомів у глибині та на поверхні покриттів та механічні властивості. Незважаючи на а широкий діапазон умов осадження, всі покриття виставляються єдиними кубічна нітридна фаза. В результаті більшення напруги зміщення, прикладеної до підкладки, призвело до збільшення мікротвердості нітридних покриттів.

У дослідженні [24] було розроблено одношарові покриття на основі Zr, Zr нітриду та Zr-карбонітриду за допомогою техніки магнетронного розпилення. Воно було проведене для контролю азоту та вуглецю концентрації в покриттях. Будову поверхні та структуру покриттів досліджували за допомогою електрона мікроскопія, який був оснащений рентгенівською спектроскопією. Механічні властивості поверхні, такі як твердість і модуль наноіндентування вимірювали за допомогою методу наноіндентування.

Підводячи підсумки можна стверджувати, що з точки зору модуля пружності та твердості, Zr-нітриди сформувалися краще, ніж Zr-карбонітриди для обох товщин покриттів. Наявність вуглецю та азоту пригнічує ріст зерна і призводить до більш щільні покриття [24].

У своїй роботі Васильєв В. В. [25] з науковцями цікавилися дослідженням процесів осадження нітридних покриттів з фільтрованої плазми вакуумно-дугової основи з порошковим катодом CrAl при подачі високовольтного імпульсного потенціалу зміщення на підкладку та особливостей CrAlN покриттів. На початковій стадії експерименту був відроблений шлях вироблення катодів будови $\text{Cr}_{0,5}\text{Al}_{0,5}$, відповідних, щоб скористатися у вакуумно-дугових методиках. Унаслідок цього був з'ясований рух синтезу, структура та властивості вакуумно-дугових CrAlN покриттів, які були синтезовані з застосування цих катодів.

З робіт дослідників [25] можна згадати, що вони також досліджували міцність та пластичність поверхневих шарів матеріалів. Порівняльні дослідження зносостійкості покриттів, отриманих методами іонно-плазмового напилення, електролітичного осадження та автокаталітичного формування, композиційних плівок, при терті в абразивному середовищі показали, що тверді покриття нітридів металів забезпечують найбільший опір зношування.

Якісне захисне покриття себе зарекомендувало саме на основі нітриду хрому, тому має гарні хімічні та механічні властивості, тому зараз широко використовується на виробництві. Зберігаючи високу твердість, значно збільшує жаростійкість, якщо додати Al. Наведена перевірка вакуумно-дугових покриттів (Cr, Al)N, які були синтезовані із прикладанням порошкових катодів, показали доволі високі захисні властивості даних покриттів супроти зносів (кавітаційного та абразивного) [25].

Новітньою технологічною постановою даного завдання є використання підходів інженерії поверхні, закладених на формуванні нанорозмірних покриттів з використанням методів вакуумного іонно-плазмового напилення [14]. Ці методи є популярними, так як вони не завдають шкоди екології і в результаті мають високу якість плівок та зносостійкість.

Для отримання багат шарових наноструктурних твердих покриттів використовувалася імплантація високими дозами іонів азоту 10^{18} см^{-2} заданих

багатоелементних покриттів, що складаються з аморфного, нанокристалічного і наноструктурного шарів. Отримані закономірності утворення багат шарового наноструктурного покриття при імплантації з високими дозами іонів азоту, а також основні фактори, які впливають на підвищення мікротвердості, пластичності, зносостійкості при різних режимах вакуумно-дугового осадження можуть бути корисними при використанні технології нанесення покриттів на металічні вироби з метою збільшення терміну експлуатації [14].

Нанесення плазмових покриттів диференційованого хімічного складу із заздалегідь заданими фізико-механічними властивостями та структурою допускає модифікувати поверхню деталей, переінакшуючи їх теплові, антикорозійні, зносостійкі та інші параметри. Тому постає питання розробки системи автоматизованого проектування технологічного процесу шліфування плазмових покриттів, щоб не було тріщини, сколів та інших пошкоджень нанесеного покриття від поверхні деталі. Врахування структурних характеристик плазмових покриттів, їх пористості, міцності зчеплення покриття з основою важливе, щоб підвищити якість та ефективність шліфувального процесу. Кінцеві дані утверджують практичну логічність між фізико-механічними характеристиками оброблюваних покриттів та провідними технологічними вимірами процесу шліфування [3].

1.5 Вплив наноструктурованих нітридних покриттів на підвищення експлуатаційних властивостей поверхонь деталей і виробів

Еволюція пошкоджень, викликаних збільшенням контактного навантаження, була досліджена на одно- та багат шарових покриттях в цементованих карбідах за допомогою сфероїдизуючого відпуску [26]. Основною метою дослідження була оцінка ефекту впливу проміжного зносостійкого карбонітридного шару на контактну стійкість до пошкоджень промислових фрезерних (багат шарових) пластин.

Виявлено, що системи з покриттям $Zr(C,N)$ демонструють вищу механічну цілісність, ніж аналоги $Ti(C,N)$. Основними причинами є відносні різні термічні залишкові напруження, що утворюються під час охолодження CVD, в результаті різний коефіцієнт теплового розширення між покриттям і підкладкою, а також власну міцність досліджуваних покриттів. Також було виявлено, що механічна реакція впливає на взаємодію між утворенням тріщин і складання шарів у зразках з багатошаровим покриттям. Тоді це підтримує корисне ефект використання $Zr(C,N)$ як проміжного зносостійкого шару в сторону посилення продуктивність промислових фрезерних пластин [26].

В результаті було виявлено, що багатошарові, а також одношарові покриття покращують властивості матеріалу, а також покращують термін служби матеріалу, властивості основи. Багатошарові покриття підвищують зносостійкість, що в покращує термін служби субстрату. Температура покриття і напруга зміщення мають значний вплив на покриття. Отже, вища температура покращує властивості основи, а зі збільшенням субстрату зміщення шорсткості покриття зменшується [1].

Результати дослідження [27] показують, що методика HiPIMS дозволяє більш щільне покриття TiN з вищою поверхневою твердістю та адгезією на відміну від TiN покриття, нанесене за допомогою методів магнетронного розпилення постійного струму (DC), що забезпечує а вищу зносостійкість. TiN під окисленим поверхневим шаром підтримує механічні властивості покриття. Коли температура підвищується до $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, шар TiN повністю окислюється і легко розтріскується.

У своїй роботі [28] Т.П. Говорун, О.В. Пилипенко, М.В. Говорун, К.О. Дядюра досліджували структурні та механічні властивості зносостійких покриттів на основі Ti , Al та N . Було з'ясовано, що структура, фазовий склад, текстура, мікроструктура і шорсткість поверхні, а отже і характеристики твердості, дуже пов'язані зі складом мішені. Реактивне магнетронне розпилення стало гарною альтернативою звичайному, тому в результаті

покращило якість покриття плівкою, шорсткість покриття стала зниженою, покращилася адгезія. У ролі надтвердих покриттів можуть бути застосовані наноккомпозитні $[Al(Ti)]_xN_{1-x}/AlN$ плівки з твердістю порядку 47 ГПа. Отже в результаті досліджень зрозуміло, що плівки завдаються кристалічній структурі, і отримують важливість пружного відновлення.

Розглянуто статтю [21], щодо структури і механізмів деформування та руйнування твердих покриттів в умовах фрикційної взаємодії, яку досліджували Колубаєв А. В. та його колеги, в якій зазначалося, що ефективні властивості конструкційних матеріалів у стадії перетворення не інспектуються хімічним складом, атомно-кристалічної та мікроструктурної, які переважно зустрічаються при їх отриманні.

Також поінакшує характер поділу спричинених тертям напруг, зменшуючи або посилюючи нестійкість ґрат. Аналіз новітніх методів модифікування поверхні, проведений у огляді, показав незамінність використання зміцнювальних поверхневих обробок, що дають підвищення антифрикційних характеристик, зносостійкості, підвищення ресурсу експлуатації трибоспряжень, зниження енергетичних витрат при терті деталей високонавантажених спряжень. Отже, постачання накладання вуглецевих алмазоподібних покриттів на робочі поверхні контактуючих деталей важконавантажених вузлів, тертя різних двигунів, дозволено відмовитися від застосування мастил [21].

Тому з дослідження зрозуміло, що неглибока енергія і температура плавлення багатоелементних покриттів, одержаних серед аргону вище, ніж для покриттів, одержаних серед азоту. З'ясовано, що зі збільшенням неглибокої енергії покриттів їх жаростійкість і корозійностійкість виростають [27].

Композитні порошки $Ni/Al-TiB_2$ були нанесені на поверхню нержавіючої сталі 316L. Потім, як-розпилення покриття відпалювали при 650 °C протягом 10, 20 і 30 год. Результати експерименту показали, що середня пористість покриття під час розпилення впала з приблизно 0,68% до 0,054%

як холодний газ розпилення підвищилася температура. Мікротвердість покриттів Ni/Al-TiB₂, відпалених при 650 °C протягом 10 год. було значно збільшено за рахунок підсилювальної ролі частинок TiB₂ і NiAl₃ і Ni₂Al₃ інтерметалевих сполук [4].

В ході дисертаційної роботи Тлеуєнов Е-Т. О. досліджував апробовані експериментальні методи дослідження поверхні, а також методи спектрального аналізу, метод визначення структурно-фазового стану. Проведення дослідження показало, що фізико-механічні властивості покриттів на основі Zr, Ti, V, Hf, Nb)N можна ефективно керувати шляхом зміни параметрів осадження, що може бути використано для отримання для жаростійких та зносостійких покриттів [29].

Як сполука фаза Ti₃AlC₂ має широкі перспективи застосування в аерокосмічній сфері завдяки своїм чудовим властивостям. Покриття Ti₃AlC₂ було виготовлено двоетапним методом осадження FCVA та після відпалу, а також систематично досліджено вплив температури відпалу на мікроструктуру, механічні властивості та корозійну стійкість покриттів Ti₃AlC₂. Результати показали, що фазовий склад і кристалічність покриттів залежали від температури відпалу. Коли температура становила 600 °C, покриття містило невелику кількість Ti₃AlC₂ і Ti_xAl_y з низькою кристалічністю. При підвищенні температури до 800 °C фаза в покритті переважала Ti₃AlC₂ з деякою кількістю TiC і Al₄C₃. Продовжуючи підвищення температури до 1000 °C, фазова структура покриття поступово змінювалася від фази Ti₃AlC₂ до фази TiC. Крім того, температура відпалу також мала значний вплив на механічні та електрохімічні властивості покриттів. З підвищенням температури від 600 °C до 1000 °C твердість покриття поступово зростала, а значення спочатку збільшувалося, а потім зменшувалося. Крім того, корозійна стійкість покриттів Ti₃AlC₂ спочатку зростала, а потім знижувалася з підвищенням температури, а найкращу корозійну стійкість покриття показало при відпалі при 800 °C [43].

Отже, покриття Ti_3AlC_2 були швидко отримані за допомогою FCVA та після відпалу. Фазовий склад покриттів Ti_3AlC_2 залежав від температури відпалу. Покриття Ti_3AlC_2 показали високу твердість і чудову стійкість до корозії.

1.6 Дослідження багат шарових, багатокomпонентних і комбінованих покриттів

Однією з сфер постійного інтересу в багатьох галузях промисловості є розробка функціональних багат шарових покриттів, що володіють відмінними експлуатаційними характеристиками. Саме тому в огляді результати досліджень структури та властивостей багат шарових структур на основі бінарних нітридів перехідних або тугоплавких металів, отриманих різними методами фізичного осадження з парової фази, нанесені магнетронним напиленням і вакуумним випарюванням, представляли вплив температури підкладки, напруги зміщення підкладки, товщини двошару та межі розділу за структурою покриттів та їх властивостями, такими як твердість, пластичність, зносостійкість і корозійна стійкість [30].

Багат шарові покриття можуть бути додатково покращені шляхом інтеграції нових нанокристалічних, нанокомполитні або аморфні матеріали як складові шари. Ще один спосіб підвищити продуктивність характеристикою багат шарової архітектури є використання нітридів, що складаються з більш ніж одного металу. Отже, більш прості матеріали дозволяють передбачити особливості структури, текстури, фізико-механічні та трибологічні властивості більш складних покриттів [30].

Автори [31] розробили двошарове нітридне покриття для Ti та його сплавів, отримане магнетронним напиленням покриття SiAlN разом із проміжним шаром Mo, де скористалися перевагами взаємодифузії та взаємореакцій на межі розділу під час циклічного окислення при 800 °C з утворенням шаруватої системи покриття з нітриду, що містить: верхній шар SiAlN, $TiN_{0,26}$ і проміжний шар змішаної фази Ti_5Si_3 і твердий розчин Ti-Mo.

Новий проміжний шар $TiN_{0,26}$ демонструє адаптивну конформованість, тим самим влаштовуючи деформацію теплової невідповідності між покриттям. Поряд з високою адгезією це забезпечує чудовий термін служби термічного циклу без утворення тріщин і відколів і окислення покриття, що спостерігається після сотень годин циклічного окислення на повітрі при $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ [31]. Отже, дані покриття демонструють чудову адгезію, здатність адаптуватися до конфігурації та чудовий захист навколишнього середовища для Ti сплавів при високій температурі. Шарувата система покриття нітридом є ефективною, оскільки вона розробляє посилений сполучний проміжний шар шляхом взаємодифузії, перехідний шар з адаптивною деформованістю та контрольованою взаємодифузією, а шар $SiAlN$ забезпечує стійкість до окислення на вільній поверхні [31].

Як відомо, деталі та двигуни покриті зносостійкими твердими покриттями, щоб продовжити термін їх служби Нітриди, карбіди та карбонітриди елементів перехідних металів, таких як Zr, W, Ti, використовують для виготовлення твердих покриттів, тому вони мають хорошу стійкість до ерозії, зносу та корозії. Актуальною є робота осадження, мікроструктура та наноідентування багат шарових наноструктурованих покриттів з нітриду та карбонітриду Zr, де для покриття нержавіючої сталі 316L була використана техніка магнетронного розпилення підкладки з багат шаровими Zr/ZrN і $ZrN/ZrCN$ з товщиною окремих шарів 250 і 500 нм для кожної композиції покриття [32]. В результаті дослідження було з'ясовано, що використання методу магнетронного розпилення постійного струму та різноманітних потоків N_2 і C_2H_2 для маніпулювання покриттями вміст азоту та вуглецю, покриття $ZrN/ZrCN$ показують кращу зносостійкість і міцність [32].

Слід також розглянути механічні властивості нітридних покриттів у нанометровому масштабі, де Заолі Жан та науковці в [33] продемонстрували інформацію про багат шарову структуру, яка складається з шарів CrN , структурованих кам'яною сіллю постійної товщини і шари AlN різної

товщини, що дає змогу вирощувати метастабільну цинкову суміш. Багатошаровість показує градієнт атомної та електронної структури, що розгорнуто внаслідок передової електронної мікроскопії та електронної спектроскопії. Градієнтні структури також мають супроводжуватися модуляцією хімічного складу [33].

Отже, експериментальне дослідження дає поради щодо опрацювання нових багатошарів з атомно-контрольованими властивостями для допустимих застосувань шляхом адаптації структури, тобто включення метастабільних фаз і створення градієнтних структур, а також хімічних складів, наприклад, шляхом маніпулювання вмістом кисню в покриттях [33].

Розглядаючи характеристику досліджень багатошаровості, а саме нітридні покриття на основі Cr і Zr, можна пов'язати їх з методами і режимами осадження. Посилення перспектив та посилення галузей застосування цієї плівки можливе способом систематизації процесу осадження, утворення технологічних затверджень для процесу морфологічного формування нанорозмірних плівок із потрібною системою властивостей [34].

Зменшення періоду багатошарових структур підвищує їх твердість, абсолютне значення якої визначається не тільки фазовим складом, а й розміром зерен в почергових шарах, об'ємна частка міжшарових кордонів і прикордонних ділянок, рівень внутрішніх напружень у складі та енергетичний коефіцієнт під час осадження. Підвищення зносостійкості багатошарових систем пов'язано зі зниженням коефіцієнта тертя, утворенням покриття з низькими напруженнями стискання, досить високою твердістю, і хороша адгезія [34].

Багатоелементні нітриди, які були створені, показали гарні механічні властивості. Стаття [35] Соболя О. В. та його колег полягала в аналізі впливу заперечного потенціалу підкладки та тиску азотної атмосфери на структурно-напружений стан і твердість нітридів на базі високоентропічних сплавів (рис. 1.4).

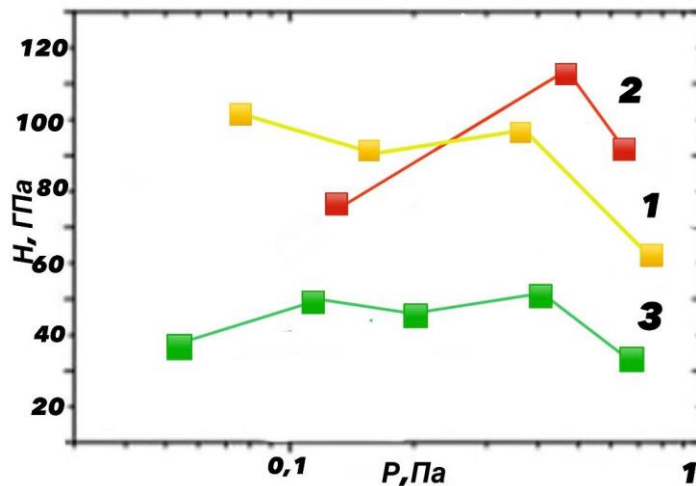


Рисунок 1.4 – Залежності мікротвердості від тиску азоту при потенціалі -200 В для покриттів (Hf, Ti, Nb, V, Zr)N (3); (Ta, Ti, V, Hf, Nb, Zr)N (2); TiN (3). Приклад сплавів (Hf, Ti, Nb, V, Zr)N (3); (Ta, Ti, V, Hf, Nb, Zr)N (2); TiN (3) отримали методом вакуумно-дугової плавки на «Булат-6» [35]

Не враховуючи крапельний компонент багатоеlementні нітридні покриття, нанесені в азоті, є однофазними з кубічними ГЦК-гратками. Покриття з підвищеним тиском азоту зумовлює до наростання величини кристалітів і послаблення мікрореформації, а підняття запасу зсуву – до зворотного ефекту. За повною величиною мікрореформація в цих покриттях вища, а розмір кристалітів – менше, ніж для мононітридів. Гранична твердість 70 ГПа здобута в нітридних покриттях, нанесених вакуумно-дуговим випаровуванням (Zr, Ti, V, Hf, Nb) сплаву при тиску азоту 0,35 Па [35].

Зараз одним із перспективних економічних методів є вакуумно-дугове осадження, яке дозволяє отримувати нітридні з'єднання на основі елементів високоентропійного сплаву з покращеними фізико-механічними властивостями.

В. Ф. Горбань, А. О. Андрєєв, М. В. Карпець, В. А. Столбовий, О. В. Канцир, О. А. Рокицька, О. І. Бужинець [36] дослідили об'єктивно існуючий зв'язок між предметами продукування нітридних покриттів на основі високоентропійного багатокomпонентного сплаву $Ti_{30}Zr_{25}Nb_{20}Hf_{15}Ta_{10}Y_5$ у

вільній ситуації в азоті і без нього (табл. 1.2). Вільний матеріал даного сплаву є твердим розчином, де за основу взято ОЦК-гратки. В чергованому напиленні прикладів в повітрі з диференційним вмістом азоту утворюється покриття на підставі ГЦК-гратки. За переважних умов напилення нітридне покриття на основі високоентропійного сплаву, який вважається багатокомпонентним має твердість до рівня 50 ГПа, а також наведений модуль пружності 350 ГПа.

Таблиця 1.2

Структура і фізико-механічні властивості отриманих покриттів з литого сплаву $Ti_{30}Zr_{25}Nb_{20}Hf_{15}Ta_{10}Y_5$ в залежності від технологічних параметрів напилення [36]

Зразок	Середовище напилення	Тиск в камері Р, Па	Структура	Н _{гт} , ГПа	Е _г , ГПа	Н _{гт} /Е _г	ε _{es}	σ _{es}
1	Вакуум	$1,1 \cdot 10^{-4}$	ОЦК	6,5	118	0,054	1,67	2,023
2	N ₂	$4,0 \cdot 10^{-3}$	ГЦК	42	310	0,135	3,69	16,750
3	N ₂	$1,5 \cdot 10^{-3}$	ГЦК	50	350	0,143	4,75	19,309
4	N ₂	$7,0 \cdot 10^{-4}$	ГЦК	49	240	0,144	4,80	18,705
5	N ₂	$2,5 \cdot 10^{-4}$	ГЦК	39	280	0,107	4,72	9,654

Зі збільшенням вмісту азоту в камері, напилення в нітридних покриттях в результаті зменшується розмір і товщина ОКР. Тому широкого застосування набув метод вакуумно-дугового осадження, так як він є популярними серед методів іонного осадження, і тому метод порошкової металургії забезпечує надійність покриттів, хоч техніка і працює в умовах потужного зношування [36].

Для процесу варіювання верхніх шарів різального інструменту дає можливість підняти робочі технічні властивості, значно заощадити, зменшуючи витрати на виробництві. Тому Загребельний В. В. підняв питання щодо зміцнення зносостійкості верхніх шарів різального інструменту з швидкорізальної сталі Р6М5 способом накладання комбінованих дискретних

і градієнтних покриттів, а також утвердження логіки позначення їх структурно фазової статури, фізико-механічних особливостей та вимірів структури на трибо технічні характеристики [37].

Тому від самого початку вироблено спец технологічний прогрес посилення поверхневих верств сталі Р6М5 первісною уривчастою лазерною обробкою і далі азотуванням, де були також досліджені властивості їх структуроутворення. У роботі вказано, що лазерна обробка дає змогу наблизити процеси поширення атомів азоту в трьох поверхневі шари сталі Р6М5, і звісно зробити меншою розсипчастість та збільшити твердість азотованого покриття [37].

Завдяки сітчасто-стілниковій структурі забезпечується вища зносостійкість, ніж структура острівного виду, тому що переривчасті ділянки з неоднаковою твердістю і товщиною дають змогу ліпшій роботі покриття і зменшують напругу під час тертя. Отже, зносостійкість збільшується до двох разів, а коефіцієнт тертя зменшується до півтора-двох разів [37].

Вченими розглядалося градієнтне покриття, в основі якого були Si, Ti і Hf, де виокремлювали багато варіантів для систематизації процесу утворення зовнішнього підшару верхнього шару. В ході експерименту було з'ясовано шлях зношування градієнтного покриття. Перевірка в різних умовах, таких як тертя ковзання без намащування та врівноваженості в положенні точіння надали результати підвищення зносостійкості інструменту з зазначеним покриттям [37].

Побудована триботехнологія сукупності підвищення експлуатаційних особливостей сталі Р6М5, при якому було використано нанесення іонно-плазмового покриття TiN, суттю якого є дискретна лазерна обробка в розпорядку плавлення поверхні невідпущеного РІ на черзі з відпуском загартованого інструменту при збільшених температурах 560 – 580 °С і суміцнення його з нанесенням покриттів.

Якісне захисне покриття себе зарекомендувало саме на основі нітриду хрому, тому має гарні хімічні та механічні властивості, тому зараз широко

використовується на виробництві. Зберігаючи високу твердість, значно збільшує жаростійкість, якщо додати Al. Наведена перевірка вакуумно-дугових покриттів (Cr, Al)N, які були синтезовані із прикладанням порошкових катодів, показали доволі високі захисні властивості даних покриттів супроти зносів (кавітаційного та абразивного) [25].

В результаті дослідження іонно-плазмового покриття TiN, яке було нанесено за вказаною технікою виявили збільшення триботехнічних особливостей порівняно з характерним методом. В результаті досліджень під мікроскопом точінням сталі 30ХГСА було встановлено механізм зношування сталі Р6М5 і було видно, що при терті з'явилося втомне зношування, яке в результаті утворює та збільшує кількість тріщин. Отже, можна зробити висновок, що за допомогою дискретної лазерної обробки, а потім азотування дані ділянки отримують високу зносостійкість та забезпечують мінімальні напруження, які виникають при терті. В ході досліджень було створено математичну модель і було створено оптимізацію техніки утворення зовнішнього підшару верхнього шару [37].

Результати опублікованих вище робіт, свідчать, що такі властивості нанокристалічних покриттів як розмір і орієнтація зерен, структура сильно залежить від технологічних параметрів осадження – іонного бомбардування, потенціалу зміщення, температури підкладки, щільності потоку та енергії іонів, що осаджуються, тому для досягнення бажаних результатів у кожному конкретному випадку необхідно прагнути оптимізації процесу осадження покриттів. Що і є основним завданням для подальших досліджень.

Висновки

Аналіз новітніх методів модифікування поверхні, проведений у огляді, показав незамінність використання зміцнювальних поверхневих обробок, що дають підвищення антифрикційних характеристик, зносостійкості, підвищення ресурсу експлуатації трибоспряжень, зниження енергетичних витрат при терті деталей високонавантажених спряжень.

Вакуумні методи показали, що вони можуть надавати якісний рівень фізико-механічних характеристик матеріалів на поверхнях деталей, дають змогу наносити густі покриття з тугоплавких хімічних поєднань, а ще алмазоподібних, які звичайними методами не вдається одержати. Вони гарантують високе зчеплення покриття до підкладки, в результаті дають рівномірні покриття без дефектів та нерівних пропорцій, поверхня покриття забезпечена високою чистотою, що екологічно важливо для виробництва.

Нанесення плазмових покриттів диференційованого хімічного складу із заздалегідь заданими фізико-механічними властивостями та структурою допускає модифікувати поверхню деталей, переінакшуючи їх теплові, антикорозійні, зносостійкі та інші параметри. Тому постає питання розробки системи автоматизованого проектування технологічного процесу шліфування плазмових покриттів, щоб не було тріщини, сколів та інших пошкоджень нанесеного покриття від поверхні деталі. Отже, проаналізувавши попередні методи можна зробити висновок, що вони мають позитивний вплив на поверхні деталей машин, постійно вдосконалюються для того, щоб вироби могли мати високу якість. Таким чином у подальшому також залишиться актуальним інтегративний критерій до постановки задач щодо підвищення довговічності деталей

Пресовані у розжареному стані форми містять схему метало матричного матеріалу з міцністю і пластичністю. Можна зробити висновок, що вакуумно-дугові покриття показали гарні механічні властивості, а саме високу зносостійкість.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА МЕТОДИКА

2.1 Закономірності створення наноструктурованих покриттів на основі нітридів, отримуваних вакуумно-дуговим магнетронним осадженням

В останні роки на промислових підприємствах одержують практичне застосування зміцнювальні та захисні покриття, зокрема високоефективні функціональні наноструктуровані нітридні покриття (НП). Серед використовуваних даних покриття мають свої переваги: малий розмір кристалітів (2 - 5 нм); фізико-хімічні властивості, що істотно відрізняються від властивостей об'ємних зразків з того ж матеріалу і призводять до підвищення міцності і пластичних властивостей матеріалу, що зміцнюється, появи в'язкості при руйнуванні. Створення та дослідження прогресивних матеріалів функціональних покриттів, що дозволяють збільшити стійкість деталі різного призначення та продуктивність підприємства загалом, є актуальним завданням. Якщо проблему отримання наноструктурованих покриттів різного призначення практично вирішено, проблема стабілізації властивостей зазначених покриттів перебуває в стадії вдосконалення. Йде пошук нових складів покриттів, що мають комплекс фізико-хімічних властивостей; методів контролю та управління структурою та властивостями осаджуваних покриттів з метою підвищення працездатності та експлуатаційної надійності покриття, що формується; принципів реалізації розроблених технологій на промисловому виробництві.

Широко застосовувані покриття на основі нітриду титану не можуть задовольняти вимоги сучасної техніки, працювати при високих температурах та в агресивних середовищах. Ряд найважливіших технічних питань може бути вирішено без легування нітриду титану такими елементами, як Zr, Mo, Cr, Fe, Si і Al і отримання складних нітридів титану [28]. Важливою обставиною, що впливає на властивості покриттів, що формуються, є

характер розташування структурних елементів зміцнювальних покриттів, наявність або відсутність їх спрямованості. Встановлення закономірностей структуроутворення наноструктурованих покриттів з метою створення технологій отримання високоефективних покриттів, стійких до екстремальних умов служби, є одним із основних завдань сучасного металознавства.

2.1.1 Нанокристалічні покриття

Нанокристалічні покриття характеризуються широкими малоінтенсивними відображеннями Х-променів. Такі плівки формуються в перехідних областях, де сильно змінена структура цих плівок. Існують три групи перехідних станів: 1) перехід із кристалічної в аморфну фазу; 2) перехід між двома фазами різних матеріалів; 3) перехід між основними двома орієнтаціями зерен одного й того самого матеріалу (рис. 2.1) [38].



Рисунок 2.1 – Схематичне зображення перехідних областей з'єднання $A_j \cdot x B_x N$. а) – область переходу з кристалічної в аморфну фазу; б) – область переходу між двома кристалічними фазами або двома основними кристалографічними орієнтаціями зерен [38]

Для покращення мікроструктури та фізико-механічних властивостей під час нанесення покриттів застосовуються бомбардування зростаючої

поверхні енергетичними іонами. Відповідно до роботи [38], це є наслідком комплексного синергічного ефекту, що включає зменшення розмірів кристалітів, ущільнення меж зерен, формування радіаційних дефектів (пар Френкеля та інших точкових дефектів), наявності біаксіальних напруг, що стискають. Залежно від розмірів кристалітів у цьому покритті ці ефекти можуть перешкоджати розвитку діяльності дислокацій. Наведені результати, у цих роботах, свідчать, що зменшення розмірів кристалітів у металах нижче за деяку порогову величину призводить до значної зміни фізико-механічних властивостей матеріалів.

2.1.2 Наноструктура нанокомпозитів

Нанокомпозитні покриття становлять нову генерацію матеріалів. Вони складаються, як мінімум, з двох фаз з нанокристалічною та аморфною структурою. Нанокомпозитні матеріали, внаслідок малої (≤ 10 нм) розмірності зерен, з яких вони складаються, і більш значущої ролі граничних зон, що оточують окремі зерна, поведуться по-різному, порівняно із звичайними матеріалами, розміри зерен яких понад 100 нм і демонструють абсолютно нові властивості. Нанокомпозити можуть мати різні наноструктури (рис. 2.2).

1. Нанокомпозити з колумнарною наноструктурою складаються з зерен, об'єднаних у наноколумнарні структури кількості вторинної (другої) фази (основного матеріалу) недостатньо, щоб повністю покрити поверхню всіх зерен (рис. 2.2 а).

2. Нанокомпозити із щільною наноглобулярною наноструктурою складаються з нанозерен, повністю оточених фазою основного матеріалу (рис. 2.2 б).

3. Нанокомпозити з щільною глобулярною наноструктурою, що складається з різних матеріалів нанозерен або нанозерен з різними кристалографічними орієнтаціями і/або структурою решітки, що складається з одного і того ж матеріалу (рис. 2.2 в) [38].

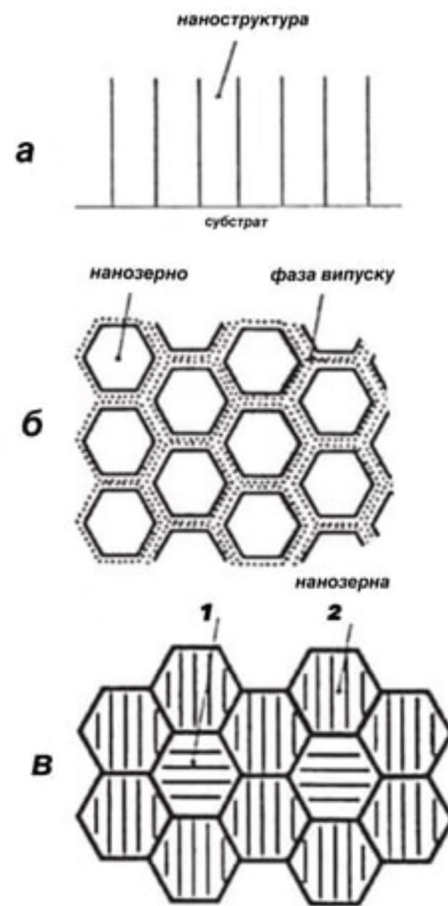


Рисунок 2.2 – Схематична ілюстрація різних структур наноструктур нанокompозитів: а) колумнарні; б) нанозерна, оточені фазою, еквівалентною основному матеріалу; в) суміш нанозерен [38]

Ця класифікація, підтверджена експериментально, ясно показує, що фізико-механічні властивості безпосередньо пов'язані з розміром та формою будівельних блоків, з яких складаються нанокompозити. Геометрія цих зерен грає вирішальну роль. Нанокompозити можуть мати різні наноструктури і, залежно від цього, різні фізико-механічні властивості. Нові унікальні фізичні та функціональні властивості нанокompозитів є рушійною силою бурхливого розвитку цих матеріалів [38].

2.1.3 Покриття з нанокристалічною структурою. Наноструктуровані багат шарові композитні покриття

Виробники різальних інструментів останнього покоління розробили гаму покриттів з нанокристалічною структурою, що мають підвищені

експлуатаційні характеристики [39]. Розглянемо докладніше деякі особливості наноструктурованих композитних покриттів (КП). В даний час КП, що використовуються для нанесення на ріжучі інструменти, можна класифікувати за кристалічною структурою на три основні групи: макрометричні ($10^{-1,5} - 10^{3,5}$) мм; мікрометричні ($10^{-4,8} - 10^{-6,8}$) мм; нанометричні ($10^{-7,8} \dots 10^{-9,7}$) мм. Відомо, що першопричиною руйнування матеріалів, що мають стандартну структуру з розмірами зерен понад $d \sim 1$ мкм, є формування тріщин, що виникають внаслідок концентрації дислокацій у різних дефектів.

У наноструктурованих матеріалах з розмірами зерен менше $d \sim 80 - 100$ нм переважаючою причиною руйнування є процеси на міжзеренних межах, що пов'язано з меншою або порівнянною кількістю атомів у зернах порівняно з їх кількістю на їх межах [39]. Зміцнені меізернові межі трансформують взаємодію між зернами, оскільки гальмується рух і генерація дислокацій, і навіть рух тріщин. Дислокації в нанорозмірних зернах практично не виникають через повне гальмування на межах зерен, а самі межі починають виконувати вирішальну роль у деформуванні та руйнуванні матеріалу. З'являється можливість формування унікальних властивостей у нанокристалічних матеріалах, а при розмірах зерен з $d \sim 5 - 10$ нм можна прогнозувати створення субатомних нанокристалічних структур та відповідних спрямованих змін властивостей матеріалів [39].

Наноструктуровані багатошарові композиційні покриття (БКП) класифікують на три групи (рис. 2.3): 1 – складаються з шарів з однаковими хімічними зв'язками та структурою; 2 – шари, що містять, з сильною відмінністю хімічних зв'язків і структури; 3 – мають шари з внутрішніми граничними проміжними підшарами нанометричної товщини [40].

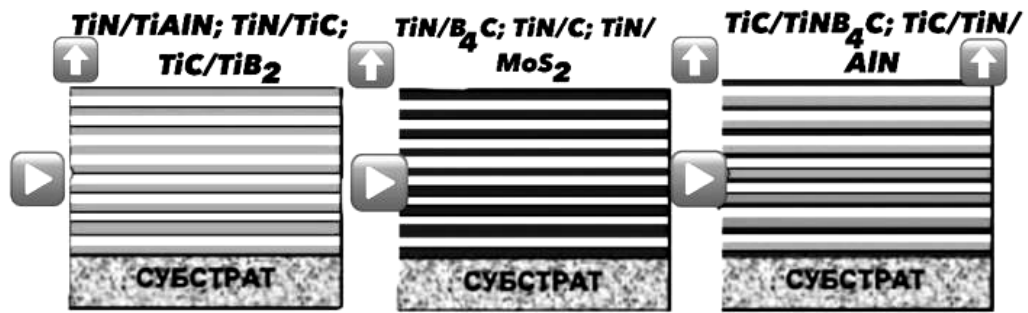


Рисунок 2.3 – Класифікація багатошарових композиційних наноструктурованих покриттів з архітектури: 1 – із шарами з однаковими хімічними зв'язками; 2 – із матеріалів із сильною відмінністю хімічних зв'язків та структури; 3 – із внутрішніми підшарами нанометричної товщини [40]

БКП, що мають шари з однаковим характером хімічних зв'язків, найбільш широко застосовують для нанесення на різальні та штампові інструменти. Найчастіше у подібних покриттях комбінують шари з нітридів, карбідів, карбонітридів та боридів перехідних тугоплавких металів IV – VI груп Періодичної таблиці, легованих алюмінієм [40]. БКП із наномодельованою структурою. Шарувата архітектура покриттів із шарами нанорозмірної товщини дозволяє фіксувати певну текстуру кожного шару покриття та створювати матеріали для покриттів нового типу. Прикладом такого «конструювання» покриття можуть бути БКП на основі TiC/TiB_2 , для яких спостерігають зростання площин з текстурою (111) TiC на площинах з текстурою (001) TiB_2 [39-40].

Мінімізація енергії граничних поверхонь є ще одним напрямом створення матеріалів для покриттів нового покоління [39]. Наприклад, для БКП на основі багатошарових композицій TiN-AlN і TiCSiC спостерігається стабілізація кубічних гранецентрованих ґрат шарів AlN і SiC в багатошаровій архітектурі покриттів відповідно TiN/AlN і TiC/SiC . Зазначений ефект стабілізації структури можливий лише для БКП з товщиною шарів менше 80 нм, а подібна архітектура БКП створює великі перспективи створення матеріалів для покриттів нового типу. У зв'язку з цим можна прогнозувати

стабілізацію решітки сполуки C_3N_4 за допомогою її вбудовування у шарувату структуру решітки Si_3N_4 . Твердість такої сполуки теоретично має бути більшою, ніж у алмазу [40]. Багатошарові покриття з супер-решітчастою структурою (Superlattice). Ще одним перспективним напрямом удосконалення покриттів є розробка «супер-решітчастої» структури покриття. У існуючій літературі дуже часто не проводять чіткого поділу між багатошаровими покриттями з нанорозмірною товщиною шарів та супер-решітчастими покриттями [39].

Необхідно розрізнити монокристалічні та полікристалічні супер-решітчасті покриття. В обох випадках йдеться про захисні покриття з екстремальними значеннями деяких властивостей, що визначає перспективність їх застосування для ріжучого інструменту. Необхідно відзначити, що не всі типи супер-решітчастих покриттів можуть мати високі значення основних властивостей. Наприклад, комбінації TiC/TiN, TiC/TiN та TiN/TiAlN синтезували з товщиною шару в діапазоні 1 – 500 нм [27]. Максимальна твердість покриття була отримана для варіанта з багатошаровою архітектурою, що має 100 до 200 шарів при товщині загальної покриття 5 мкм, що відповідає товщині шару від 25 до 50 нм. Ефекти супер-решітчастої структури виявляються також при зміні та інших параметрів, наприклад модуля пружності окремих шарів покриття.

В даний час основні моделі, що встановлюють механізми зв'язку параметрів супер-решітки з особливими властивостями покриттів, будуються на положенні, згідно з яким зміна властивостей пов'язана з обмеженням переміщення дислокацій на граничних поверхнях. Однак, слід визнати, що ці моделі є дискусійними та мають гіпотетичний характер.

2.2 Метод магнетронного розпилення і його основні характеристики

Найбільшого поширення у промисловості набули фізичні способи осадження: магнетронне розпилення (MP) та вакуумно-дугове осадження.

Багатокомпонентна плазма вакуумно-дугового розряду, реактивного магнетронного розпилення є унікальним фізичним інструментом для структурного перетворення властивостей покриттів з метою надання їм нанокристалічного стану. Отримання покриттів з нанокристалічною структурою, високими фізико-механічними властивостями та експлуатаційними характеристиками можливе шляхом певного вибору технологічних параметрів осадження, поглиблення розуміння мало вивчених процесів формування покриттів в умовах осадження.

Магнетронне розпилення відбувається внаслідок нанесення покриттів за допомогою роботи у вакуумі, в якому діють магнетрони, тобто розпилювальні системи. Його особливість в тому, що лінії магнітних полів націлені впоперек ліній струму.

Для того, щоб метод був діяльним та ефективним слід обмежити ймовірність витоку електронів на анод при їх рухах вздовж силових ліній магнітних полів, а траєкторія дрейфа повинна бути замкнута. Дане розпилення дає змогу отримати високу щільність іона струму, а також скорішу швидкість розпилення в порівнянні з низьким тиском, який становить 0,1 Па та ще нижче. [8].

MP здобуло значне використання в методі вакуумного нанесення покриття складних оксидів.

Реактивне магнетронне розпилення застосовано для виготовлення тонкоплівкових резисторів NbTiN, що працюють при температурі рідкого гелію. Питомий опір плівок NbTiN при 4 К можна регулювати в широкому діапазоні від приблизно 100 см до 10 000 см за допомогою параметрів розпилення, таких як розрядний струм і тиск розпилення. Цей широкий діапазон налаштування значно полегшує проектування та виготовлення вбудованих резисторів із зосередженими елементами для міліметрових і субміліметрових інтегральних схем. Встановлено, що тонкоплівкові резистори NbTiN мають дефіцит азоту, а питомий опір сильно залежить від атомного співвідношення азоту. Чисельна модель реактивного

магнетронного розряду була використана для розуміння механізму налаштування, і результати моделювання якісно узгоджуються з вимірними [11].

На завершення, процес розпилення був оптимізований для виготовлення високоомних тонких плівок NbTiN з пригніченою T_c нижче ніж 4К. Ці плівки можна регулювати в діапазоні питомого опору від близько до , що підходить для вбудованих резисторів із зосередженими елементами в надпровідних. Щоб виготовити тонкоплівкові резистори NbTiN, ми спочатку вибираємо низьку швидкість потоку азоту, потім регулюємо струм розряду вздовж магнетрона, і точно налаштовуємо питомий опір [11].

Вакуумне середовище забезпечує довгий середній вільний шлях для зіткнення між джерелом випаровування та підкладкою. Це також дозволяє контролювати кількість забруднення газами та парами під час обробки. Воно створюється вакуумною системою, яка включає камеру осадження, камери введення, якщо вони використовуються, систему вакуумного насоса, систему вихлопу, систему впуску газу та пов'язану трубопровід.

Система вакуумної обробки складається з робочої камери, вакуумних насосів із відповідним трубопроводом, вихлопної системи та системи газового колектора. Лінійний і обертальний рух можна ввести в камеру за допомогою механічних або магнітних каналів. У механічних проходах можуть використовуватися металеві сильфони, які не допускають витоку, ущільнювальні кільця з диференціальною накачкою, які слід змашувати, або феррофлюїдні ущільнення.

Вкладиші та екрани використовуються для запобігання відкладенню на незнімних вакуумних поверхнях. Розпізнавання блокування може використовуватися для моніторингу деяких параметрів, і коли параметр виходить за межі «вікна» параметра, ініціюється певна дія, зазвичай через мікропроцесор. Найкращий час для характеристики системи обробки для базових цілей, коли вона добре працює та виробляє прийнятний і відтворюваний продукт [41].

Простір параметрів процесу для реактивного напилення є багатовимірним, охопленим критичними параметрами керування процесом, такими як співвідношення азот-аргон, швидкість потоку газу, струм розряду та загальний тиск. Зв'язок між цими параметрами та характеристиками плівки (температура переходу, питомий опір і хімічний склад). Ця складність призводить до величезних труднощів в оптимізації процесу. У більшості випадків для вибору умов осадження використовуються лише емпіричні правила, а параметричні аналізи проводилися дуже обмежено.

2.3 Умови проведення експерименту

Наноструктуровані зміцнювальні покриття на основі нітридів Ti, Ti-Zr, Ti-Al, Ti-Cr формували методом вакуумно-дугового магнетронного осадження на тестових зразках із швидкорізальної сталі Р6М5 та твердого сплаву ВК8 (розміри зразків 10x12x3, 3x3x2). Процес здійснювали на встановленні ВУП 5М, оснащеної електродуговими випарниками та магнетронами на постійному струмі.

Структуру, властивості і морфологічні особливості покриттів, що формуються, досліджували на атомно-силовому мікроскопі, растровому електронному мікроскопах TESLA BS₃₅₀ з приставкою для мікроаналізу EDAX Genesis 2000, трансмісійному мікроскопі JEM-200CX.

2.4 Методи дослідження структури і властивостей покриттів

2.4.1 Метод скануючої (растрової) електронної мікроскопії

Одним з найбільш широко застосовуваних методів електронної мікроскопії є метод растрової (скануючої) електронної мікроскопії (РЕМ чи СЕМ). Зображення формується при скануванні пучка, подібно до растру електронно-променевої трубки телевізора з наступною передачею сигналу від детектора електронів на екран. Вибір того чи іншого типу зображень, що визначається завданням – топографія зразка досліджується з використанням

вторинних електронів (SEI), а склад із використанням відбитих (розсіяних) електронів (BSI).

Роздільна здатність електронно-променевого методу залежить від частоти лінії решітки. Останнім часом все більше зусиль приділяється підвищенню частоти, і в цій роботі представлено новий метод для створення електронно-променевих поверхонь високої міцності. Перехресні решітки з частотою до 14 832 ліній/мм (крок 67 нм) були успішно виготовлені за допомогою звичайного скануючого електронного мікроскопа без спеціальної системи генерації. Якість решітки була достатньо високою для створення високоякісних покриттів. У цьому методі надтонку поверхню можна виготовити лише за допомогою односпрямованого сканування на резисті, що може покращити якість поверхні та значно скоротити час виготовлення [42].

Кількість контрольних параметрів для виготовлення поверхні може бути зменшена до двох порівняно з шістьма параметрами, необхідними для звичайних методів, що полегшує використання електронно-променевого методу. Частота виготовленню пропорційна збільшенню експозиції. Таким чином, частота решітки може бути точно визначена заздалегідь, і нульове поле може бути легко отримано в електронно-променевому методі. Якість виготовлених поверхонь було проілюстровано отриманими мікрофотографіями. Локальну деформацію повного поля поблизу індукованої тріщини вивчали, щоб перевірити потенціал застосування цього методу.

Основні моменти:

- запропоновано новий метод растрового променя для виготовлення перехресних решіток розміром менше 100 нм.
- успішно виготовлено крос-ґратки з частотою до 14832 ліній/мм.
- кількість контрольних параметрів для виготовлення решітки можна зменшити до двох.
- якість решіток підтверджено за допомогою мікрофотографій, візерунків муару, перетворення Фур'є (FT) і фазового аналізу.

- локальну деформацію поблизу тріщини було вивчено для перевірки потенціалу застосування [42].

2.4.2 Рентгенофазовий аналіз

Структурно-фазовий склад покриттів досліджували за методом рентгенофазового аналізу із використанням рентгенівського дифрактометра. Рентгенівськими дифрактометрами називають установки для дослідження атомно-молекулярної структури речовин на основі розсіювання рентгенівського випромінювання. Цими речовинами можуть бути як кристалічні, такі некристалічні об'єкти [44].

Використання спеціальних приставок до дифрактометрів дозволяє проводити аналіз при високих температурах, у вакуумі або інертних атмосферах, при негативних температурах і розмірах інтенсивність розсіювання рентгенівських променів під малим кутом. У всіх дифрактометрах передбачена можливість монохроматизації характеристичного рентгеновського виділення, а в дифрактометрах з пропорційними або сцинтиляційними рахунками та можливість селективної реєстрації квантів дифрагованого рентгенівського випромінювання з певною енергією [45].

Основними частинами дифрактометра ДРОН-2,0 є власне рентгенівський апарат, гоніометричний блок, блок автоматичного управління, електронно-обчислювальний пристрій, пристрій виведення інформації.

Структура дифрактометра по фокусуванню Брего-Брентано наведено на рисунку 2.4. Рентгенівські промені, що виходять з фокусу 1 рентгенівської трубки (що знаходиться на колі фокусування) і сформовані в первинний пучок системою щілин 2, 4 і щілиною Соллера 3, що обмежують, потрапляють на досліджуваний зразок 5, площина якого є дотичною. Дифраговані рентгенівські промені від досліджуваного зразка через щілини

Соллера 6, приймальну щілину 7, що знаходиться на колі фокусування, і щілину, що обмежує, 8 потрапляють у лічильник квантів.

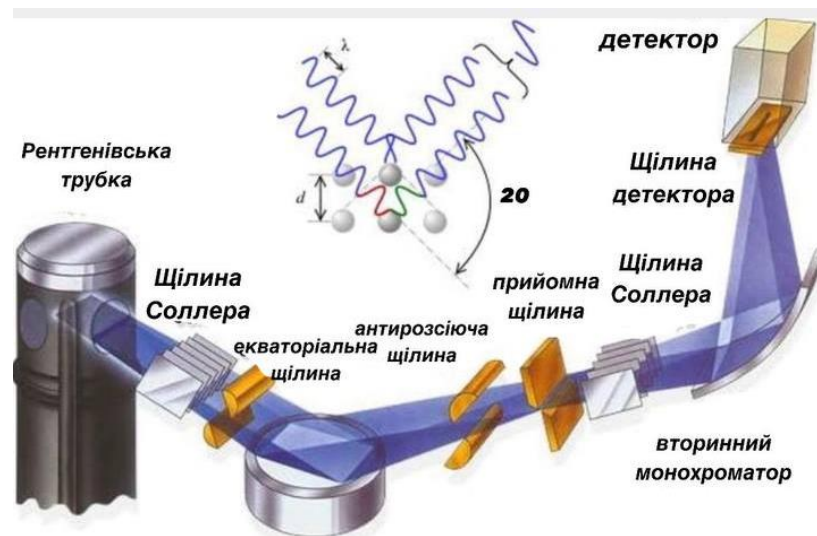


Рисунок 2.4 – Структура дифрактометра [45]

Живлення дифрактометра здійснюється від трифазної мережі змінного струму частотою 50 ± 1 Гц, напругою 380/220 В з допустимим відхиленням $\pm 10\%$ від номінального значення; споживана потужність не більше 5,5 кВА, максимальна висока напруга на трубці - 50 кВ, максимальний анодний струм - 60 мА; нестабільність високої напруги та анодного струму в діапазоні від 15 до 50 кВ та від 4 до 60 мА після двох годин прогрівання – 0,03% [45].

2.4.3 Просвічувальна електронна мікроскопія

Просвічувальні або трансмісійні електронні мікроскопи (ПЕМ чи ТЕМ) – це мікроскопи, які використовують пучок електронів для візуалізації зразків і створення сильно збільшеного зображення. ТЕМ можуть збільшувати об'єкти до 2 мільйонів разів. ТЕМ використовують електронний промінь високої напруги для створення зображення. Електронна гармата у верхній частині ТЕМ випускає електрони, які подорожують через вакуумну трубку мікроскопа. Замість скляної лінзи, що фокусує світло (як у випадку світлових мікроскопів), ТЕМ використовує електромагнітну лінзу, яка фокусує електрони в дуже тонкий пучок. Потім цей промінь проходить крізь

зразок, який є дуже тонким, і електрони або розсіюються, або потрапляють на флуоресцентний екран у нижній частині мікроскопа. На екрані з'являється зображення зразка з різними частинами, які відображаються різними відтінками відповідно до його щільності. Потім це зображення можна вивчати безпосередньо в ТЕМ або фотографувати [46].

2.4.4 Метод атомно-силової мікроскопії

На сьогодні скануюча зондова мікроскопія (СЗМ) є найпопулярнішим методом дослідження наноструктурованих матеріалів [47]. Широкий спектр режимів СЗМ дозволяє досліджувати велику кількість властивостей матеріалів (механічні, електричні, магнітні та ін.). У ході аналізу поверхні модифікованих зразків було використано наступну СЗМ методику – атомно-силову мікроскопію [47].

Заміри виконували на повітрі за сприятливих умов. Результати вимірів шорсткості проводилося шляхом системних дій застосовуючи в АСМ.

Висновки

В останні роки на промислових підприємствах одержують практичне застосування зміцнювальні та захисні покриття, зокрема високоефективні функціональні наноструктуровані нітридні покриття (НП). Серед використовуваних даних покриття мають свої переваги: малий розмір кристалітів (2 - 5 нм); фізико-хімічні властивості, що істотно відрізняються від властивостей об'ємних зразків з того ж матеріалу і призводять до підвищення міцності і пластичних властивостей матеріалу, що зміцнюється, появі в'язкості при руйнуванні.

Для дослідження структури, фазового складу і властивостей НП застосовували електронну та атомно-силову мікроскопію, рентгеноструктурний аналіз.

Серед рентгенівських дифрактометрів загального опису набув ДРОН-2,0, бо має простоту та перевагу при отриманні стану хімічного поєднання елементів у матеріалі (потрібна лише невелика кількість зразка) і метод здатний проводити кількісний аналіз. Застосування спеціальних приставок уможливорює проведення досліджень з охопленням області кутів, починаючи з 12; у температурних інтервалах від +20 до +2000 про °С і від +20 до -180 °С.

ПЕМ формує зображення в електронному мікроскопі шляхом розсіювання електронів. Взаємодія між первинним пучком електронів і зразком призводить до зміни енергії та траєкторії без зміни його кінетичної енергії. Електрони, обернено розсіяні, є прикладом пружного розсіювання. Непружне розсіювання відбувається, коли електрон передає деяку кінетичну енергію атомам зразка.

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

3.1 Основні вимоги до покриттів

До покриття в залежності від матеріалу та умов експлуатації деталей та ріжучого інструменту, з'являються свого роду технологічні вимоги, які можна поділити на чотири категорії [30].

По-перше, це умова, яка враховує умови роботи інструменту. Покриття повинно мати: високу твердість, що перевищує твердість матеріалу інструменту; стійкістю до високотемпературної корозії; відсутність схоплюваності з оброблюваним матеріалом у всьому діапазоні температур різання; стійкістю до руйнування при коливанні температур та напруги; сталістю механічних властивостей, навіть при температурах, близьких до температур руйнування інструментального матеріалу.

По-друге, це необхідність сумісності властивостей матеріалу покриття з властивостями матеріалу інструменту: спорідненість кристалохімічної будови матеріалу покриття та інструменту; оптимальне співвідношення матеріалів покриття та інструменту за модулями пружності, коефіцієнтами Пуассона та лінійного розширення, теплопровідності; мала схильність до освіти крихких вторинних сполук.

По-третє, це вимоги до технологічних особливостей методу нанесення покриттів: створення в процесі нанесення покриття на інструмент умов, не надають суттєвого впливу на фізичні та кристалохімічні властивості матеріалу інструменту.

По-четверте, вимоги щодо покриття в цілому: покриття повинно бути суцільним і мати постійну щільність по всьому об'єму, тим самим самим, захищаючи матеріал інструменту від зіткнення з оброблюваним матеріалом та газовим середовищем; стабільність властивостей покриття у часі; трохи

коливань товщини покриття в процесі роботи, що дозволяє не змінювати рельєф матеріалу інструменту [30].

3.2 Характеристика і різновиди матеріалів покриттів

У таблицях 3.1 і 3.2 наведено узагальнені дані про різні види покриттів, які застосовуються для зміцнення різного виду деталей і інструменту [30, 33, 38].

Таблиця 3.1

Узагальнені дані про різні види покриттів [30, 33, 38]

	(T)	(A)	(A)	C	(F)
	TiN-покриття	TiAlN-покриття	AlTiN - AlTiN нанопокриття	TiCN-покриття	FIRE-покриття
Вид нанесення покриття	PVD	PVD	PVD	PVD	PVD
Т-ра нанесення покриття (C ⁰)	400-500	400-500	400-500	400-500	400-500
Основа	швидкорізальна сталь, твердий сплав	швидкорізальна сталь, твердий сплав, кермет	швидкорізальна сталь, твердий сплав, кермет	швидкорізальна сталь, твердий сплав, кермет	швидкорізальна сталь, твердий сплав, кермет
Будова шарів	одношарове	одношарове	одношарове і нанощарове	одношарове	багатошарове
Колір	золотий	сіро-фіолетовий	синій антрацит	сірий	червоно-фіолетовий
Твердість (HV 0,05)	2200	3300	3400	3000	3000
Робоча т-ра (C ⁰)	<600	<800	<900	<450	<800

Продовження таблиці 3.1 [30, 33, 38]

	(T)	(A)	(A)	C	(F)
	TiN- покриття	TiAlN- покриття	AlTiN - AlTiN нанопокриття	TiCN- покриття	FIRE- покриття
Теплопровідність (kW/mk)	0,07	0,05	0,05	0,1	0,05
Спосіб обробки	універсальний	точення, сверління	усе окрім фрезерування	фрезерування, нарізання різьби	сверління, фрезерування, нарізання різьби
Рекомендовані оброблювані матеріали	універсальні	сталь, лиття	нержавіючі, загартовані сталі, нікелеві сплави	високоміцні матеріали, сталі	універсальні
Особливості	економічне стандартне покриття	теплотійке	для високошвидкісної, жорсткої обробки	нечутливі до ударних навантажень	широко використовуване

Таблиця 3.2

Узагальнені дані про різні види покриттів [30, 33, 38]

	(TiAlZrN)	(AlTiZrN)	(Y)	(TiSiN)	(ZrN)
	TiAlZrN - покриття	AlTiZrN - покриття	TiAlSiN - покриття	TiSiN - покриття	ZrN - покриття
Вид нанесення покриття	PVD	PVD	PVD	PVD	PVD
Т-ра нанесення покриття (C ⁰)	400 ⁰ -500 ⁰	400 ⁰ -500 ⁰	400 ⁰ -500 ⁰	450 ⁰ -500 ⁰	400 ⁰ -500 ⁰

Продовження таблиці 3.2 [30, 33, 38]

	(TiAlZrN)	(AlTiZrN)	(Y)	(TiSiN)	(ZrN)
	TiN-покриття	TiAlN-покриття	AlTiN - AlTiN нанопокриття	TiCN-покриття	FiRE-покриття
Основа	швидкорізал ьна сталь, твердий сплав, кермет	швидкоріза льна сталь, твердий сплав, кермет	швидкорізал ьна сталь, твердий сплав, кермет	швидкорізал ьна сталь, твердий сплав, кермет	швидкоріза льна сталь, твердий сплав, кермет
Будова шарів	багатошаров е	наношаров е	багатошарове, нанокомпозит не	багатошарове, нанокомпозит не	багатошаро ве
Колір	блідо- золотий	блідо- золотий	бронзовий	мідний	блідо- золотий
Твердість (HV 0,05)	3300	3400	3500	4000	2500
Робоча т-ра (°C)	< 800	< 800	< 800	< 800	< 700
Теплопровідн ість (kW,mK)	0,05	0,05	0,03	0,03	0,04
Вид обробки	фрезеруванн я, сверлінняна різання різьби	сверління, нарізання різьби	сверління, розвертання, фрезерування	сверління, розвертання, фрезерування	сверління, фрезеруван ня, декор
Переважно оброблювані матеріали	універсальні	нержаваюч і сталі, Ni сплави	універсальне, чугунки, нартувальні сталі, високоміцні сталі, композити	універсальне, вуглецевісталі, автоматні сталі, Mn- сталі, жароміцна сплави	титан, Al, Ni -сплави, нержавіючі сталі
Особливості	кращий схід стружки	зниження тертя	висока твердість	знижена адгезія	знижена адгезія

A-покриття або TiAlN-покриття (алюмонітрид титану). Візуальна відмінність: колір чорно-фіолетовий. Спеціальне покриття для обробки абразивних матеріалів (чавуни, Al-Si сплави) та/або при температурних навантаженнях, а також обробка без мастильно-охолоджувальної рідини (MOP) або з обмеженим використанням MOP, для обробки глибоких отворів або отворів малих діаметрів. Особливо збільшується продуктивність інструменту з таким покриттям під час роботи на високих режимах різання [30, 33, 38].

Супер A-покриття або AlTiN-покриття (нітрид алюмо-титану) nanoA-покриття або AlTiN nano-покриття (нітрид алюмо-титану). Візуальна відмінність: колір чорно-фіолетовий. Це покриття і досі постійно удосконалюється. Завдяки оптимізації структурних, хімічних та механічних властивостей супер A-покриття були досягнуто: екстремально висока теплотвердість, дуже хороша стійкість до окисдування та відмінна адгезія покриття. Це покриття наноситься тільки на твердосплавні інструменти і добре підходить для обробки важкообробних загартованих сталей (>52 HRC) та для високошвидкісної обробки. Дуже добре підходить для обробки нержавіючих сталей [30, 33, 38].

C-покриття або TiCN-покриття (карбонітрид титану). Візуальна відмінність: колір сіро-фіолетовий. Завдяки низькій силі тертя відмінно підходить для нарізування різьблення в сталях. Завдяки підвищеній міцності може використовуватися при роботі на удар або при обробці важкообробних матеріалів. Не призначений для обробки без MOP або з застосуванням олійного туману [30, 33, 38].

F-покриття або FIRE-покриття/nanoFIRE Візуальна відмінність: фіолетовий колір. Багатошарове градієнтне TiAlN покриття. Універсальне покриття, у 2 рази більшої продуктивності, ніж TiN. Багато переваг у порівнянні із звичайними покриттями TiN, TiAlN та TiCN. Покриття має відмінну жаростійкість, високу твердість. Поєднання FIRE плюс MolyGlide ідеально підходить для "сухої" та високошвидкісної обробки [30, 33].

T-покриття або TiN-покриття (нітрид титану) Візуальна відмінність: колір жовто-золотий. Одношарове покриття, дешеве та універсальне. Це покриття збільшує продуктивність, але не так, як A, C або F [30].

Y-покриття або TiAlSiN-покриття. Візуальна відмінність: бронзовий колір. Високотверде, теплостійке багатшарове покриття спеціально для обробки високоміцних матеріалів, таких як загартовані сталі та чавуни [30].

AlTiZrN-покриття. Візуальна відмінність: колір блідий золотий. Особливо підходить для обробки нержавіючих сталей при високі вимоги до евакуації стружки, також для обробки Ni-сплавів [30, 33, 38].

TiSiN-покриття. Візуальна відмінність: мідний колір. Нанокompозитне покриття з високою теплостійкістю для обробки вуглецевих сталей, автоматних сталей та Mn-сталей. Покриття знижує ймовірність кратерного зносу. Застосовується для обробки жароміцних сплавів. Лімітовано наноситься на свердла та фрези із твердого сплаву [33, 38].

ZrN-покриття. Візуальна відмінність: колір блідий золотий. Покриття спеціально для обробки титану, м'яких Ni-сплавів, чистих Al сплавів та сплавів Al-Si, де Si <12%. Освіта наклеп на ріжучу кромку знижено завдяки гарному відведення стружки [38].

TiAlZrN-покриття. Візуальна відмінність: колір світлозолотий. Подальший розвиток покриття FIRE для обробки сталі. Основна сфера застосування даного покриття: проблеми при відведенні стружки [38].

3.2.1 Однокомпонентні покриття

TiN – традиційне, широко застосовуване з'єднання, що має високий комплекс властивостей. Висока маслянистість поверхні нітриду титану знижує температуру інструменту у процесі металообробки. Нітрид титану має широку область гомогенності, яку можна реалізувати за зміни технологічних параметрів у процесі нанесення покриття. Це дозволяє в значних межах змінювати структуру та фізико-механічні властивості покриттів, такі як мікротвердість, в'язкість, залишкові напруги, адгезія до

підкладки, когезія верств. Ці властивості є значною мірою нетрадиційними, методи їх визначення для покриттів розроблені порівняно нещодавно. Нітрид титану наноситься на вуглецеву, нержавіючу та швидкорізальні сталі, тверді сплави та кераміку. Галузь застосування: різальний, формоутворюючий та штамповий інструмент, хірургічний інструмент, пари тертя [30, 33, 38].

ZrN – зносостійке покриття з високою твердістю, гарною термостійкістю, опірністю до термічних ударів та корозії. Має більш високим опором до стирання, ніж TiN, не взаємодіє з розплавленими металами (Сe, Ве та ін.) та розведеними соляною, сірчаною, азотною та іншими кислотами. Біосумісність покриття та стійкість його до біологічному середовищі людини визначає його використання у медичних цілях. Область застосування – хірургічний інструмент, біоімпланти, зуболікарський інструмент, декоративні цілі [30, 33, 38].

CrN – порівняно м'яке покриття, що поєднує хороші трибо логічні властивості із відносною хімічною інертністю. Має найкращу корозійну стійкість ніж TiN, особливо у водних розчинах. CrN зменшує налипання на інструмент м'яких металів, таких як Al, Cu, Ti сплави. Висока температуростійкість та опір окисленню роблять дане покриття придатним для використання в середній та важкій металообробці вуглецевих та нержавіючих сталей, алюмінієвих та мідних сплавів. Регулювання технологічного процесу при нанесенні покриття дозволяє отримувати різні склади - від CrN, що має високу зносостійкість, до Cr₂N, що має підвищену твердість. Область застосування: штампової та формотворчий інструмент, хірургічний інструмент [30, 33, 38].

Hf₃N₄ – покриття, що має високу твердість, зносостійкість і термоміцністю, високою енергоємністю. Використовується для обробки титанових та жароміцних сплавів. Підвищення працездатності покриття досягається за рахунок його додаткового відпалу в повітряному середовищі. При цьому зменшуються внутрішні напруження в покриттях, а в поверхневих шарах покриттів утворюються окисні фази, що володіють високими

мастильними властивостями та енергоємністю. Зменшення внутрішніх напруг у покриттях підвищує їх здатність запасати енергію деформації у процесі зовнішнього тертя [30, 33, 38].

Cr_3C_2 – покриття, що має високу твердість, жаростійкість, зносостійкість при високих температурах, що добре проводить струм. Входить до складу керметів [38].

TiC – покриття, що має високу твердість і більшу стійкість до окислення, ніж TiN . Служить провідником за високої температури, входить до складу керметів, стійко в атмосфері азоту при 2772 К, не розчиняється в соляної кислоти [38].

ZrC – термостійке, металоподібне з'єднання з більшою стійкістю до окислення, ніж ZrN , що має високу твердість, хорошу окалинотійкість та зносостійкість при високих температурах; проводить електричний струм. Область застосування: при обробці матеріалів зі зниженою пластичністю. Властивості з'єднань Cr_3C_2 , TiC , ZrC не повністю вивчені. Проводяться подальші дослідження [38].

3.2.2 Покриття складної структури

Враховуючи відносно невисоку ефективність ріжучих інструментів з вказаними однокомпонентними покриттями (сильна відмінність їх хімічного складу та властивостей), була розроблена гама покриттів для різних груп оброблюваності різанням важкооброблюваних матеріалів. В зв'язку з тим що створити композиційне покриття універсального призначення для всіх груп оброблюваності практично неможливо, розроблялися композиційні покриття вузько службового призначення, але що забезпечують максимальну ефективність при різанні матеріалів конкретної групи оброблюваності [30].

TiCN – покриття, що має високу твердість і низький коефіцієнт тертя проти TiN . Карбонітриди перехідних металів залучають увагу завдяки їх унікальним властивостям, таким як висока твердість і модуль Юнга, висока електропровідність, значна температурна стійкість, пружність та опір корозії.

Галузь застосування: металорізальний інструмент, особливо механічно навантажені ріжучі кромки інструменту в безперервних процесах різання, штамповий інструмент. Використовується для різання сталевих сплавів, нержавіючої сталі, обробки в'язких матеріалів, високошвидкісного різання [30, 33, 38].

TiAlN – розроблене на початку 90-х років покриття з високою твердістю та температуростійкістю. Покриття має підвищену еластичність, що значно знижує можливість його сколювання з поверхні інструменту. Висока температура покриття (до 800 оС) визначається утворенням плівки окису алюмінію, що має низьку теплопровідність і значну хімічну стабільність. Нітридні покриття, що містять алюміній мають високу стійкість до окислення [750 °С для $(\text{Ti}_{75}\text{Al}_{25})_{1-x}\text{N}_x$, 830 °С для $(\text{Ti}_{40}\text{Al}_{60})_{1-x}\text{N}_x$] і зберігають високу працездатність при високих швидкостях різання важкообробних матеріалів. Покриття добре підходить для різання титанових та нікелевих сплавів, нержавіючої сталі, загартованих матеріалів, литих сталей та пластиків. Температуростійкість покриття визначає його використання при високошвидкісній та без емульсійній обробці матеріалів [30, 33, 38].

Керування технологічним процесом формування покриття дозволяє отримувати склади із змінними властивостями залежно від процентного співвідношення Ti та Al. При цьому змінюються твердість, коефіцієнт тертя, шорсткість поверхні та колір покриття. Все це дозволяє оптимізувати властивості покриття до виконання конкретної задачі. Галузь застосування: різальний, формотворчий, штамповий та хірургічний інструмент [33, 38].

TiZrN – висока твердість, термодинамічна стійкість, міцність сполуки обумовлені великою подобою структур та близькими розмірами атомів, які забезпечують наявність значних областей взаємної розчинності атомів Ti та легуючого компонента Zr у відповідних нітридах. Максимальна мікротвердість покриття TiZrN – 32,2 ГПа спостерігається за вміст 6-10 % Zr, що перевищує значення H_ц для покриттів TiN на 22 % [30, 33, 38].

Перспективним є покриття (Ti-Zr)CN на основі карбонітридів Ti та Zr, мікротвердість якого відповідає 64 ГПа. Дослідженнями встановлено екстремальний характер зміни інтенсивності зношування ріжучого інструменту в залежності від складу покриття [30, 33, 38].

При обробці заготовок з сталей 30ХГСА та 12Х18Н10Т мінімальна інтенсивність зношування спостерігалася у пластин зі сплаву ВК6 з покриттям TiZrN при вмісті 8-16 % Zr. Встановлено, що мінімальна інтенсивність зношування пластин з карбонітридним покриттям (Ti-Zr)CN відповідає тому ж змісту легуючого компонента, що і пластин з покриттям на основі нітриду. Мінімальний знос спостерігається при вмісті ацетилену 25-35 % та 20-25 % при обробці заготовок із сталей 30ХГСА та 12Х18Н10Т відповідно. Використовується при різанні жароміцних сталевих залізонікелевих, титанових сплавів, нержавіючих сталей тощо, де покриття TiN є неефективними [30, 33, 38].

TiMoN – покриття, що має високу твердість, зносостійкість, термодинамічною стійкістю. Сприяє зниженню середніх питомих, нормальних навантажень та контактних напруг. Максимальна мікротвердість покриття TiMoN становить 47-53 ГПа при вмісті 25-62 % Mo. Найбільш ефективно при різанні титанових сплавів при концентрації молібдену 10-37 % Mo, використовується при різанні жароміцних залізо нікелевих сталей, нержавіючих сталей, де покриття TiN є неефективними. Властивості даного покриття мало вивчені, проводяться подальші дослідження [30, 33, 38].

ZrMoN - покриття, що має високу твердість, зносостійкість, термодинамічною стійкістю. Максимальна мікротвердість покриття. ZrMoN становить 44-46 ГПа при вмісті 25-36 % Mo. Найбільш ефективно при різанні титанових сплавів при концентрації молібдену 10-25 % Mo. Властивості даного покриття мало вивчені, проводяться подальші дослідження [33, 38].

TiCrN – покриття, що має вищу опірність окислення і зберігає свої властивості при більш високих температурах за порівняно з покриттями TiN та CrN. Для цього покриття характерна значна стабілізація мікротвердості за

часом. Подані дані у роботах [30, 38] вказують на сильну залежність пластинок ВК6 від вмісту хрому з'єднанні TiCrN.

Максимальне підвищення стійкості при обробці сплавів ХН77ТЮР та ВТ20 забезпечується при оптимальному співвідношенні титану та хрому. Зокрема, при точенні сплаву ХН77ТЮР максимум стійкості забезпечує покриття (80 % Ti і 20 % Cr), час як при обробці титанового сплаву ВТ20 найкращі результати були отримані при використанні пластинок з покриттям (25 % Ti та 75 % Cr) [30, 38].

Таким чином, можна зробити висновок, що зміна складу композиційного покриття TiCrN істотно впливає тепловий стан інструменту. Збільшення вмісту хрому у покритті стабілізує його властивості за рахунок заміни атомів азоту атомами хрому та зростання міцності зв'язку Me-Me. Отже, ефективність зміцнення даним покриттям також залежить від розмірів інструмента, що зміцнюється [30, 38].

3.2.3 Переваги багатокомпонентних покриттів над однокомпонентними

Проведений аналіз найпоширеніших у промисловості покриттів складного складу дозволяє виділити наступні переваги багатокомпонентних покриттів у порівнянні з однокомпонентними [30, 33, 38]:

- працездатність деталей та ріжучого інструменту зі зносостійкими покриттями складного складу визначається параметрами структури покриття, спрямовано керуючи якими можна суттєво змінювати властивості покриття.
- стійкість деталей і ріжучого інструменту з покриттями складного складу залежно від складу покриття та умов різання в 1,5-4 рази вище стійкості різального інструменту з однокомпонентними покриттями.
- склад зносостійкого покриття істотно впливає на процеси, які відбуваються на контактних майданчиках інструменту.
- покриття складного складу завдяки високій тріщиностійкості, міцним властивостям, високому рівню стискаючих залишкових напруг стримують

процеси освіти та розвитку тріщин. Відносно низький рівень контактних та теплових навантажень у поєднанні з більш високим опірністю покриттів складного складу процесам тріщиноутворення є однією з причин більшої працездатності інструменту з такими покриттями.

- спрямовано змінюючи властивості покриття шляхом його легування або змінюючи склад газового середовища під час конденсації, можна керувати термомеханічною напруженістю ріжучого клина інструменту, стримувати процеси тріщиноутворення та руйнування покриття [30].

3.2.4 Багатошарові композиційні покриття

Новим резервом підвищення працездатності зносостійких покриттів стало застосування багатошарових покриттів. Було виявлено подальше підвищення твердості, тріщиностійкості та зносостійкості. В даний час розроблено різні технології нанесення багатошарових композиційних покриттів. Ряд розроблених технологій вакуум-плазмового нанесення багатошарових покриттів передбачають використання перед нанесенням твердих покриттів м'яких підшарів. Перевага в цьому плані надається хрому та молібдену. Наявність таких м'яких шарів завтовшки до 1,5 мкм підвищує адгезію покриття з підкладкою, вони є буфером, де гальмуються тріщини, що виникають у основному шарі покриття при різанні і не поширюються в основу. Крім того, ці шари в ряді випадків заліковують поверхневі тріщини, які формуються під час заточування інструменту [33, 38].

Численними дослідженнями встановлено, що як проміжний шар між покриттям і інструментальною матрицею, що згладжує різку відмінність їх властивостей, а також підвищує опірність матриці термопластичного деформування, може бути використаний титан [30].

Наступний напрямок розвитку технологій передбачає чергування моношарових та покриттів складного складу в процесі нанесення покриття. Багатошарові покриття, що містять шари складного складу TiN-TiCN-TiN та TiAlN-CrN дозволяють знизити не тільки температурні та механічні фактори,

ініціюючі схоплювання, але і збільшують опірність покриття руйнування в умовах адгезійних процесів. Хороший опір покриття такому руйнуванню обумовлено гетерофазною будовою та зміною властивостей перерізу, що дозволяє гальмувати "тендітну тріщину" при її розвитку [48].

Визначено, що твердість та міцність багатошарового покриття збільшується із зменшенням товщини індивідуальних шарів до одиниць нанометрів. Наприклад, якщо одношарові покриття TiCrAlN мають твердість 24 ГПа, то багатошарові покриття TiAlN-CrN з товщиною шарів відповідно 15 нм і 6 нм має твердість 35 ГПа. Розвиток плазмової техніки дало можливість точного регулювання за заданою програмою тиску та складу реакційного газу, ступеня фокусування плазмового потоку, сепарування потоку краплинної фази. Все це дозволило розвинути технологію отримання композиційних покриттів, що являють собою структуру надгратки. Покриття даного типу являють собою ряд шарів, що чергуються різного складу та товщини. Товщина кожного шару може змінюватись від нанометрів до кількох мікрон. Зокрема освіта надграти з переміжних шарів TiAlN та CrN з періодом 3,8 нм дозволяє збільшити твердість та скоротити абразивне зношування отриманого покриття в порівнянні з покриттями з TiAlN [30].

Підвищення працездатності різального інструменту з багатошаровими композиційними покриттями обумовлено тим, що дані покриття відповідають вимогам "третього середовища", тобто. мають у своєму складі шари, що відповідають властивості інструментальної матриці, шари, що забезпечують високу опірність зносу в умовах знакозмінної напруги та алгезійно-втомних процесів.

3.3 Результати експериментальних досліджень покриттів

3.3.1 Структурні та рентгеноструктурні дослідження покриттів TiN

Фотографії мікроструктури поверхні та поперечних шліфів покриттів TiN, отриманих за різних режимів, представлені на рисунках 3.1-3.2.

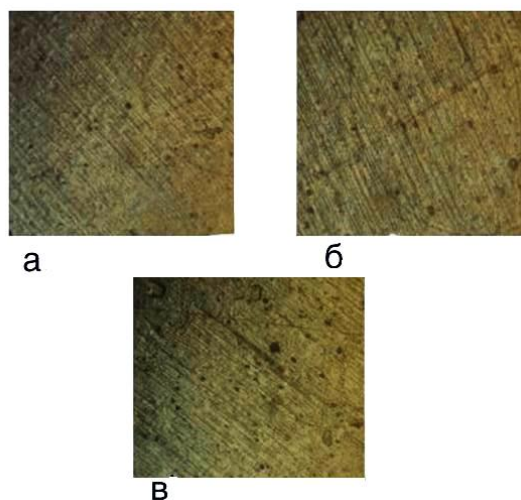


Рисунок 3.1 – Оптичні фотографії поверхні покриттів нітриду титану TiN, нанесених на сталі Р6М5 за різними технологічними режимами ($U = 140$ В, $P = 0,04$ Па): а - $I_d = 120$ А, б - $I_d = 140$ А, в - $I_d = 160$ А; $\times 200$

Покриття TiN – щільне, має низьку поверхневу пористість та малий вміст краплинної фази α -Ti. З фотографій поперечних шліфів видно, що при всіх режимах наплення формується покриття зі стовпчастою структурою зерен TiN (рис. 3.2). Встановлено тенденцію зменшення розміру зерен при зниженні струму дуги та тиску реакційного газу в камері.

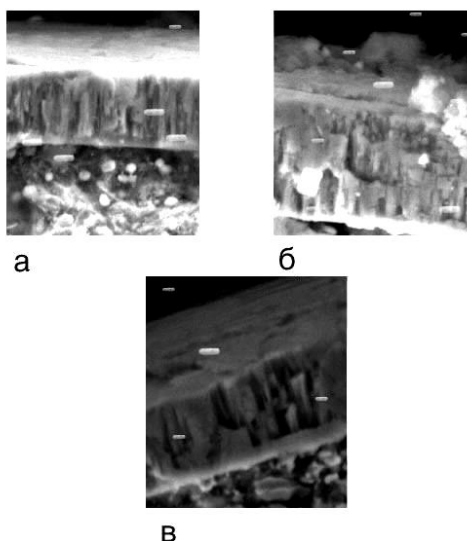


Рисунок 3.2 – Морфологія поверхні зламу покриття TiN, нанесеного по технологічним режимам: опорна напруга $U=140$ В, тиск реакційного газу камері $P=0,06$ Па, струм дуги: а – $I_d=120$ А, б – $I_d=140$ А, в – $I_d = 160$ А, $\times 10\ 000$

В результаті рентгеноструктурного аналізу встановлено, що для покриттів TiN, осаджених методом магнетронного розпилення при потенціалі зміщення -70 В характерне утворення тільки дифракційного піку TiN суттєво нижчої інтенсивності (рис. 3.3). Параметр решітки покриттів нітриду титану становить $0,4279$ нм, що суттєво перевищує табличне значення параметра решітки нітриду титану ($a = 0,4241$ нм). Підвищені значення параметра решітки покриттів TiN можуть свідчити про наявність високої напруги, що стискає.

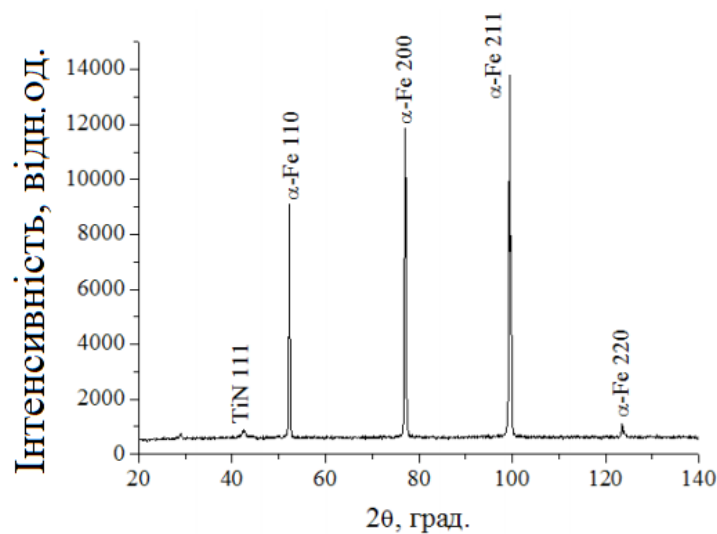


Рисунок 3.3 – Фрагмент рентгенівських дифрактограм покриттів TiN, сформованих методом магнетронного розпилення

Коефіцієнт тертя на зразку зі швидкорізальної сталі з покриттям TiN, отриманим методом магнетронного розпилення, становив $0,73$, причому, коефіцієнт тертя в період приробітку значно менше, ніж на вихідному зразку без покриття. Зменшення коефіцієнта тертя та періоду приробітку імовірно пов'язане з меншою шорсткістю поверхні TiN, сформованого методом магнетронного розпилення. Так як при сухому терті ковзання деформаційна та адгезійна складові сили тертя залежить від природи матеріалу та його мікрогеометрії, то зі зменшенням шорсткості деформаційна складова сили тертя знижується, а адгезійна складова збільшується.

3.3.2 Будова та морфологічні особливості покриттів на основі багатокомпонентних нітридів титану, легованих цирконієм та алюмінієм Ti-Zr-N та Ti-Al-N

Для початкової стадії формування покриттів на основі Ti-Zr-N та Ti-Al-N характерне краплеутворення, що відповідає утворенню покриття з рідкої фази (рис. 3.4).

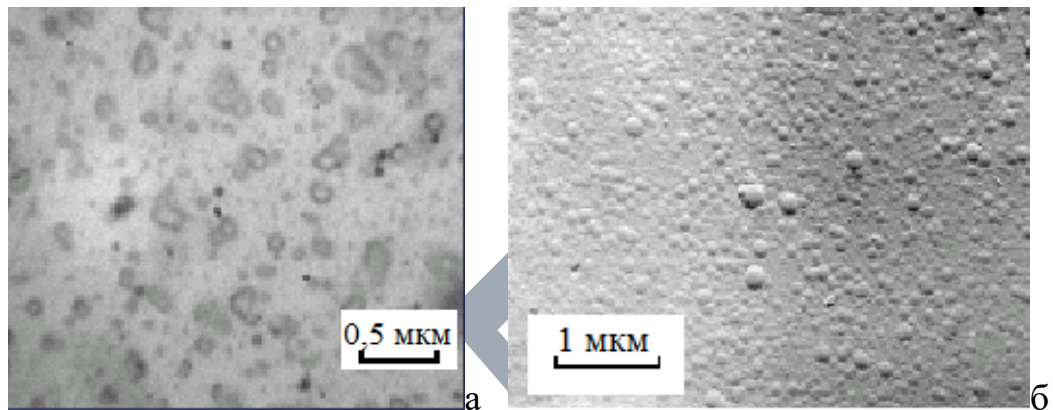


Рисунок 3.4 – Стадія зростання покриттів: а) Ti-Zr-N, б) Ti-Al-N – краплеутворення (дані ПЕМ)

На наступній стадії відбувається мінімізація поверхні при заданому обсязі (осферичування), що супроводжується утворенням ізометричних структур - глобул сфероподібної форми (0,5 - 0,96 мкм), у яких повністю відсутня будь-яка спрямованість граничних областей у просторі (рис. 3.5).

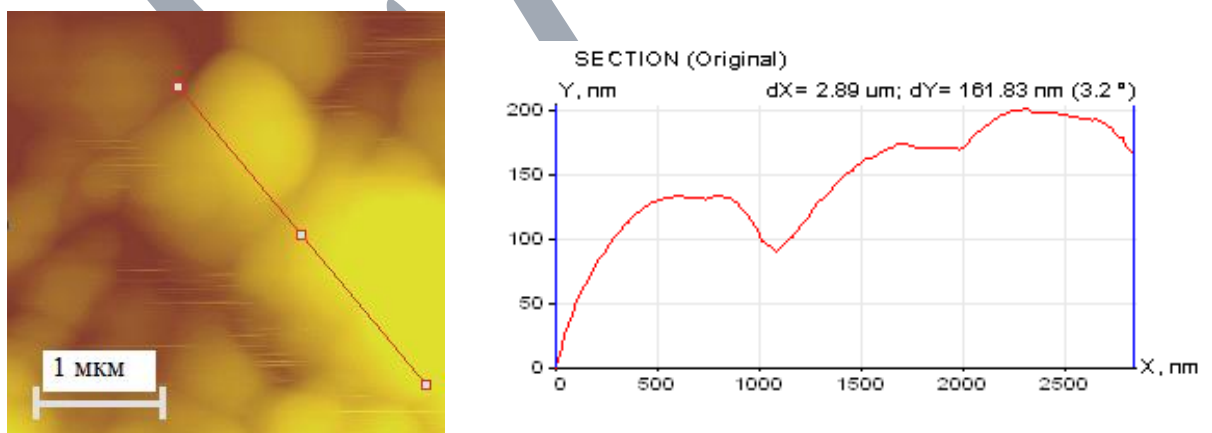


Рисунок 3.5 – Глобулярна стадія росту покриттів, притаманна для Ti-Zr-N (аналогічно Ti-Al-N) (дані АСМ)

На глобулярній поверхні, зі збільшенням товщини покриття, відбувається утворення розгалуженої системи вхідних кутів по межах напівсфер, що сприяє підвищенню швидкості формування покриття за вибраних умов і проявляється в огрубленні будови глобул, покритті їх поодинокими (Ti-Zr-N) та численними (Ti-Al-N) псевдогранями (100), перпендикулярними до площини підкладки (рис. 3.6).

Поява псевдограней (100) – наслідок формування покриття за умов часткової чи повної втрати морфологічної стійкості гранного зростання. Освіта численних дрібних псевдограней (100) на сферичних поверхнях неминуче призводить до прояву принципу Гросс-Меллера – природного добору з наступним укрупненням кристалітів, псевдограні (100) яких співвідносяться з паралельністю поверхні покриття.

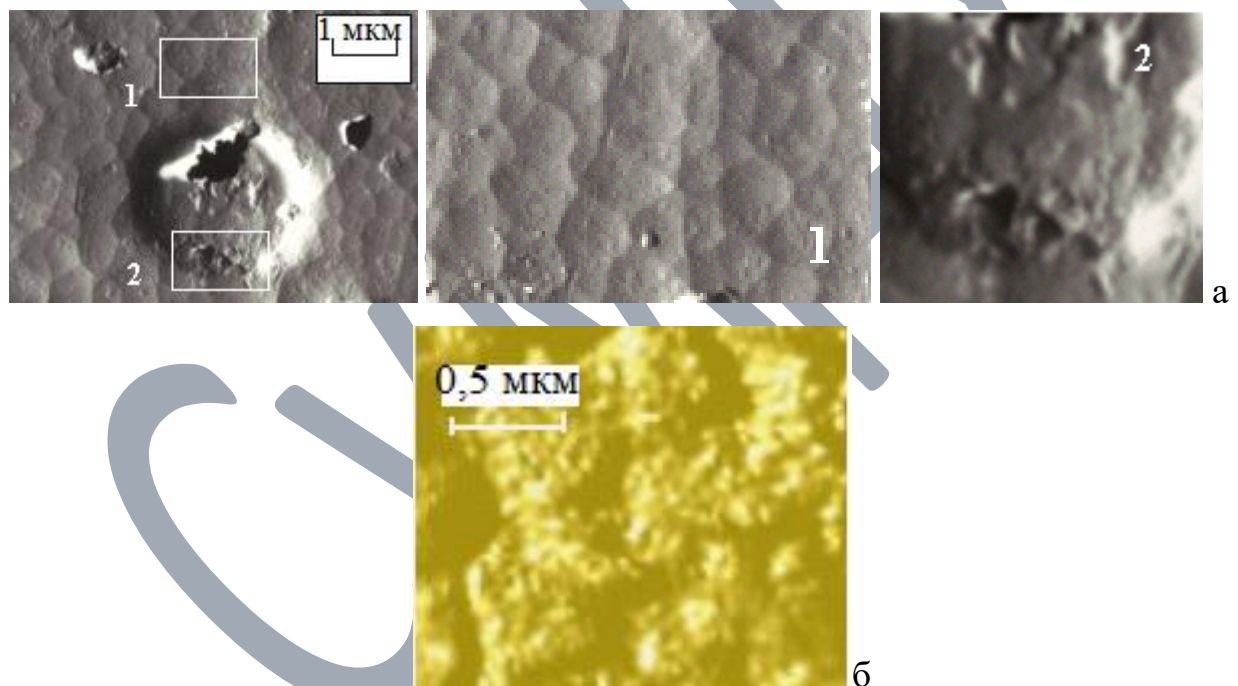
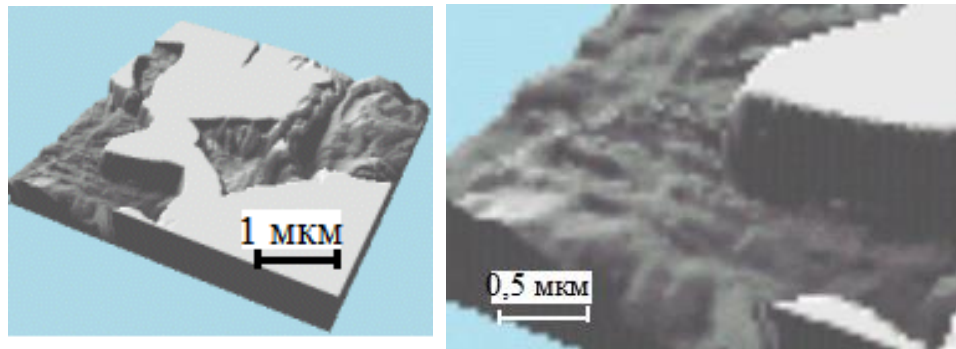


Рисунок 3.6 – Одиначні (Ti-Zr-N) (а) та численні (Ti-Al-N) (б) утворення на глобулах псевдограней (100), перпендикулярних до площини підкладки (дані ПЕМ)

Формування покриття Ti-Al-N на інструментальних матрицях відбувалося з локальними особливостями (рис. 3.7). Для процесу

осадження характерні такі механізми як формування блочності, а, в загальному випадку, поява морфологічної ієрархії у вигляді доменності, пластинчастості, волокнистості та інших типів втрати монокристалності, оскільки у всіх випадках має місце "перекачування" пружної об'ємної енергії в міжфазну (прикордонну або поверхневу) енергію.



Риунок 3.7 – Місцеві особливості формування покриття на основі Ti-Al-N (дані PEM)

Результати локального хімічного аналізу (PEM BS 300 з приставкою для мікроаналізу EDAX Genesis 2000) показали, що покриття, що зміцнює на основі Ti-Al-N, сформоване методом магнетронного осадження титанової та алюмінієвої мішеней нерівномірне за складом.

На ранніх стадіях на поверхні покриття, що формується, утворюються первинні нерівноважні структури (рис. 3.8), що характеризуються стовпчастою будовою.

На початкових стадіях перекристалізації спостерігається одиничне формування зазначених стовпчастих (стрижневих) підструктур із збереженням суцільності (когерентності) – рис. 3.8, а з наступним частковим розпадом первинних локальних структур (рис. 3.8, б). Загальний вигляд (згори) зазначених локальних областей наведено на рис. 3.8, в. Одиничне формування зазначених стовпчастих (стрижневих) підструктур свідчить, що стовпчасті підструктури необов'язково утворюються на початкових стадіях. Останнє, пов'язане з витратою в поверхневому шарі фази з великим КР і подальшим її концентруванням через проміжок часу, що визначається

розмірами кристалітів (областей когерентного розсіювання) та їх орієнтування щодо напрямку впливу іонів.

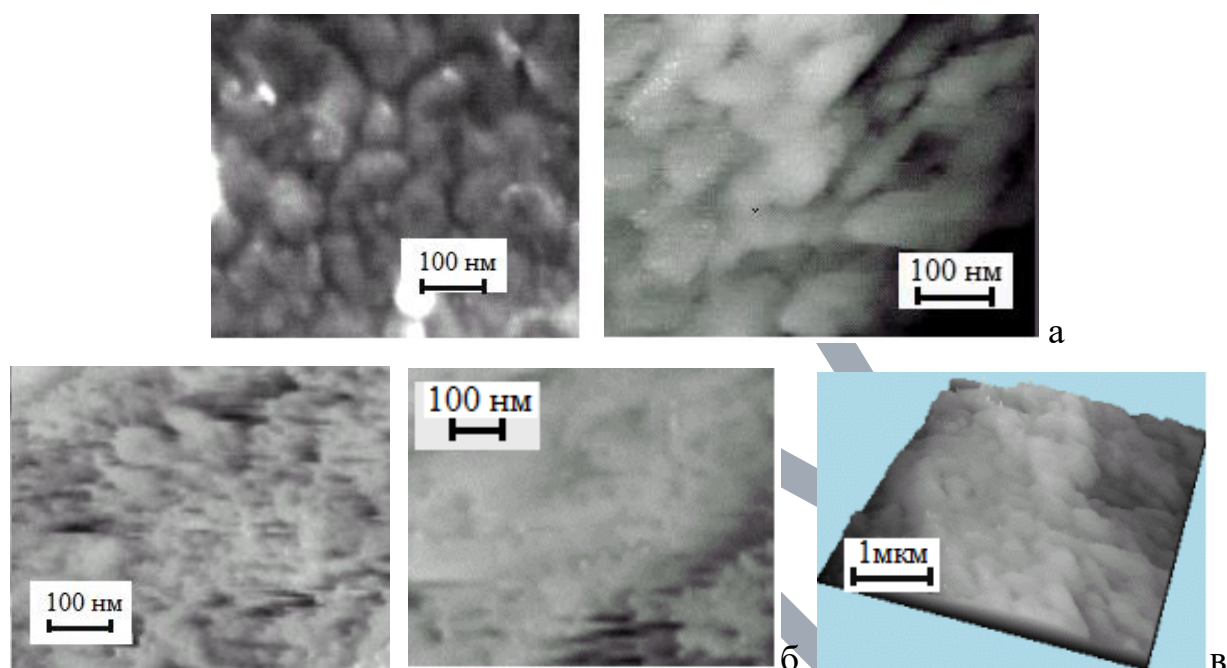


Рисунок 3.8 – Первинне утворення нерівноважних структур, що характеризується стовпчастою будовою покриття Ti-Al-N (дані АСМ)

На склі наноструктурованого покриття Ti-Al-N, отриманого у вузькому діапазоні технологічних параметрів, простежується стовпчаста текстура кристалітів (рис. 3.9).

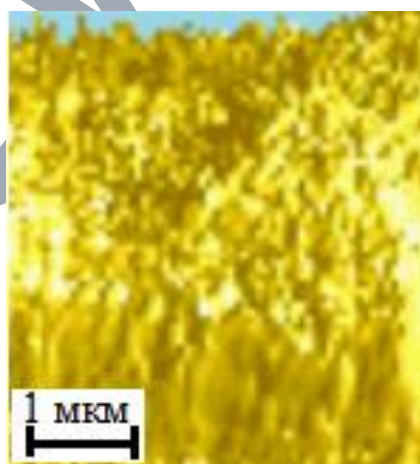


Рисунок 3.9 – Стовпчаста текстура кристалітів плівкового покриття Ti-Al-N (дані АСМ)

Як відомо [30], порушення когерентності для твердотільних систем може здійснюватися різними релаксаційними механізмами, що обумовлено можливістю для таких систем знижувати свою енергію шляхом вибору внутрішньої структури, взаємного розташування когерентних фаз та оптимізації їх форми (наприклад, за наявності багатозфазних метастабільних структур). Саме собою порушення когерентності призводить до "перекачування" об'ємної енергії в поверхневу міжфазну.

Процеси наноструктурування мають значно ширші можливості для збереження когерентності міжфазних меж. Відповідно з'являється можливість по-новому поглянути процеси релаксації. Досі розглядаються твердотільні перетворення у рамках класичної кристалографії, у разі наноструктурованих покриттів це може призводити до переоцінки ролі дислокації, оскільки для збереження когерентності між кристалічними фазами є суттєві обмеження щодо симетрії зазначених фаз, тоді як для наноструктур таких обмежень суттєво менше. Загальний підхід до ролі пружних та непружних полів для твердотільних процесів в обох випадках зберігається. Однак для наноструктурованих плівкових покриттів, по-перше, як показано Самойловичем М.І. та Беляніним А.Ф., значно розширюються симетрійні можливості між наноструктурами як фазами, а по-друге – використання стрижневих підструктур суттєво змінює картину когерентної взаємодії між різними формами [30, 33, 38].

3.3.3 Результати дослідження наноструктурованих комплексних покриттів (TiCr)N

Покриття (TiCr)N осаджувалися вакуумно-дуговим методом магнетронного розпилення з двох катодів на зразки з термообробленої сталі Р6М5. У процесі експериментів змінювалися такі технологічні параметри: струм дуги, величина парціального тиску азоту, потенціал зміщення на підкладці. На рисунку 3.10 наведено мікроструктуру покриттів (TiCr)N,

одержаних при різних парціальних тисках азоту, при потенціалі зміщення на підкладці 100 В.

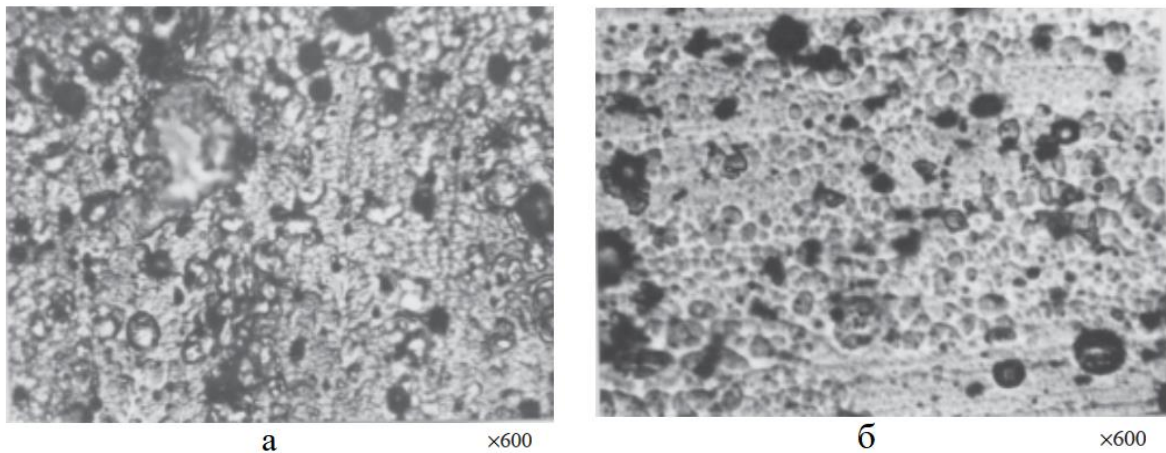


Рисунок 3.10 – Мікроструктура поверхні (TiCr)N, при струмі дуги $I_{\text{д}}(\text{хром}) = 50 \text{ А}$, при струмі дуги $I_{\text{д}}(\text{титану}) = 100 \text{ А}$. Величина парціального тиску азоту – $P(\text{N}_2) = 0,7 \text{ Па}$ (а); $P(\text{N}_2) = 0,08 \text{ Па}$ (б). Товщина покриття 8 мкм.

Збільшення $\times 600$

Фазовий аналіз отриманих покриттів показує, що вони складаються з твердого розчину Cr у нітриді титану. У покриттях присутні також $\alpha\text{-Ti}$ та Cr. При постійних технологічних параметрах (струм дуги, потенціал зміщення) залежно від парціального тиску шорсткість поверхні змінюється від 0,5 – 0,54 мкм при тиску $P(\text{N}_2) = 0,7 \text{ Па}$ до 0,3 – 0,4 мкм при $P(\text{N}_2) = 0,08 \text{ Па}$. Мікротвердість покриттів (Н), отриманих при тиску азоту 0,7 Па при навантаженні 200 Н, склала 18,6 – 20,3 ГПа.

3.3.4 Осадження багат шарових покриттів з шарами нанометричної товщини

На рисунку 3.10 представлено структуру багат шарового нанопокриття TiN-ZrN та наведені результати по залежності мікротвердості багат шарових нанопокриттів різного складу (рис. 3.11) від кількості, що входять до їх складу (загальна товщина покриттів $\sim 2 \text{ мкм}$).

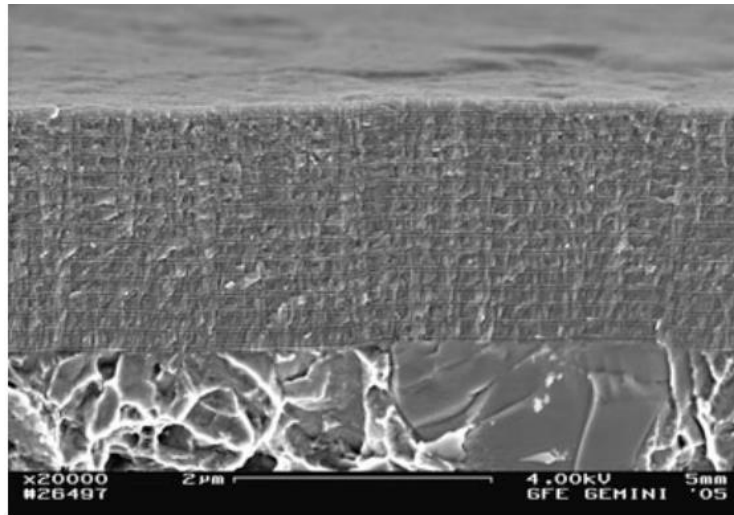


Рисунок 3.11 – Будова багатошарового нанопокриття TiN-ZrN, збільшення x20 000

Видно, що покриття, що складаються з 60 шарів при товщині кожного з шарів ~ 33 нм, мають високу мікротвердість (рис. 3.12). Це пов'язано з тим, що зерно такого покриття не встигають коагулювати в процесі осадження. Зі збільшенням кількості шарів покриття до 180 (тобто із зменшенням товщини кожного з шарів до 10 нм) розміри зерен ще більше мікротвердість покриттів TiN-NbN і TiN-ZrN досягає значень 70 ГПа. Добре відомо, що мікротвердість традиційних одношарових покриттів на основі цих же сполук залежно від режимів їх осадження знаходиться в межах 20-30 ГПа. У той же час слід розуміти, що зазначена вище закономірність не є універсальною та застосовною для всіх хімічних сполук. Наприклад, при збільшенні кількості шарів багатошарного покриття TiN-CrN понад 80 (зменшення їх товщини менше 25 нм) його твердість навпаки знижується.

Експерименти показують, що мікротвердість багатошарових нанопокриттів, що містять з'єднання із шарів з мікротвердістю ≥ 20 ГПа, збільшується приблизно у 2 рази, тобто досягає значень ≥ 40 ГПа. Наприклад, максимальна твердість для покриття TiN/NbN з товщиною окремих шарів 4 нм, становить 50 ГПа, а для TiN/VN – близько 55 ГПа. [38,40]. Такий результат добре узгоджується із результатами інших авторів [38,40].

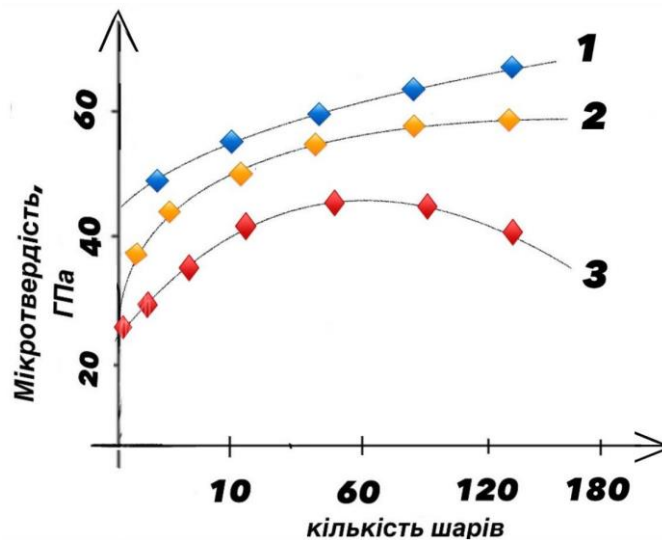


Рисунок 3.12 – Залежності мікротвердості багат шарових покриттів TiN-NbN(1), TiN-ZrN(2) та TiN-CrN(3) від товщини їх шарів (при загальній товщині покриття 2 мкм)

3.3.5 Дослідження зносу та тертя покриттів на основі TiN

Було досліджено закономірності тертя та зносу покриттів на основі TiN, нанесених на швидкорізальну сталь Р6М5, в умовах фрикційного контакту зі сталлю 45. Випробування проводилися за схемою "площина - циліндр" на машині тертя СМЦ при швидкостях ковзання 0,8 м/с та 1,3 м/с. Товщина покриття у експериментах складала 8 мкм.

Коефіцієнти тертя визначалися в залежності від нормального навантаження для трьох випадків: сухого тертя, тертя з мастилом МІХП-3, тертя з мастильно-охолоджуючою рідиною (МОР) (рис. 3.13). Залежності мають немонотонний характер, хоча, в цілому, переважає зростання коефіцієнта тертя зі збільшенням навантаження під час випробувань сталі Р6М5 без покриття та деяке зниження – при випробуваннях покриття з мастилом. Загальним як при терті по покриттях, так і по сталі Р6М5 без покриття є те, що мінімальні значення коефіцієнта тертя спостерігаються при змащуванні мастилом, максимальні – при сухому терті.

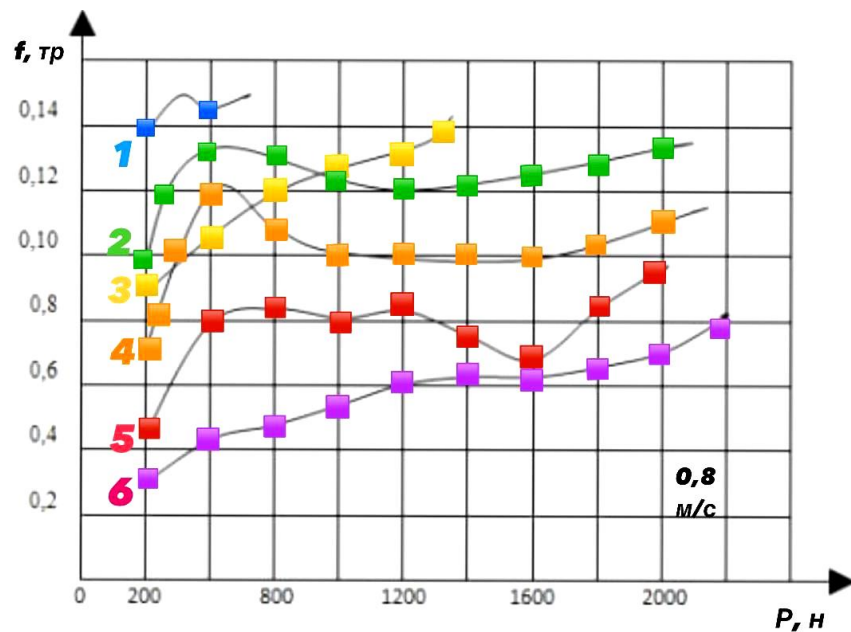


Рисунок 3.13 – Залежність коефіцієнта тертя від навантаження при терті сталі 45 по сталі Р6М5 та по сталі Р6М5 із покриттями TiN при швидкості 0,8 м/с: 1 – сталь Р6М5 із покриттям TiN без мастила; 2 - сталь Р6М5 із покриттям TiN з МОР; 3 – сталь Р6М5 із покриттям TiN з мастилом; 4 – сталь Р6М5 без покриття і без мастила; 5 – сталь Р6М5 без покриття із МОР; 6 – сталь Р6М5 без покриття з мастилом

Зазначені закономірності якісно характерні також для швидкості 1,3 м/с, проте задиротворення у даному разі настає при іншому рівні навантажень (табл. 3.3).

Таблиця 3.3

Навантаження задиротворення при сухому терті та терті зі змащенням сталі 45 по сталі Р6М5 без покриття та з покриття із TiN, в Н

Масило	Зразок	Швидкість	
		0,8 м/с	1,3 м/с
Без мастила	TiN	200	200
	Р6М5	800	800
МОР	TiN	>2000	>2000
	Р6М5	1200	1200
Масло	TiN	>2000	>1800
	Р6М5	2000	1800

3.3.6 Узагальнення результатів по дослідженим покриттям

Узагальнені результати по дослідженим покриттям наведено в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4

Характеристики покриттів, отриманих методом магнетронного розпилення

Покриття	Колір	Мікротвердість, ГПа	Коефіцієнт тертя по сталі 45	Температура початку окислення на повітрі, °С
TiN	золотистий	23 - 25	0,55	550 - 600
(Ti, Cr)N	золотисто- сірий	28 - 30	0,5	850 - 900
(Ti, Al) N	фіолетово- чорний	31 - 35	0,6	800 - 850
(Ti, Zr) N	сіро- чорний	35 - 37	0,25	850 - 900
CrN*	срібно- металічний	12 - 14	0,3	650
ZrN*	золотисто- білий	26 - 28	0,5	550
TiN-NbN**	срібно- металічний	32 - 68	-	800 - 850
TiN-ZrN**	сіро- чорний	30 - 65	-	850 - 900
TiN-CrN**	золотисто- сірий	25 - 40	-	850 - 900

* - для порівняння літературні дані

** - багатошарові

Висновки

1. Досліджені в роботі покриття TiN є щільними, мають низьку поверхневу пористість та малий вміст краплинної фази α -Ti, при всіх режимах напилення формується покриття зі стовпчастою структурою зерен TiN. Встановлено тенденцію зменшення розміру зерен при зниженні струму дуги та тиску реакційного газу в камері.

2. Встановлено, що на покриття (TiCr)N, які осаджувалися вакуумно-дуговим методом магнетронного розпилення з двох катодів на зразки з термообробленої сталі Р6М5 впливають технологічні параметри: струм дуги, величина парціального тиску азоту, потенціал зміщення на підкладці.

3. Фазовий аналіз отриманих покриттів (TiCr)N показує, що вони складаються з твердого розчину Cr у нітриді титану. У покриттях присутні також α -Ti та Cr.

4. (Ti, Cr)N – покриття, що має вищий опір окисленню і зберігає свої властивості при більш високих температурах порівняно з покриттями TiN та CrN. Для покриття (Ti, Cr)N характерна значна стабілізація мікротвердості за часом.

5. Зміна складу композиційного покриття (Ti, Cr)N істотно впливає на тепловий стан інструменту. Збільшення вмісту хрому у покритті стабілізує його властивості за рахунок заміни атомів азоту атомами хрому та зростання міцності зв'язку Me-Me. Тому ефективність зміцнення даним покриттям залежить від розмірів інструмента, що зміцнюється.

6. В результаті досліджень було встановлено характер зміни інтенсивності зношування ріжучого інструменту в залежності від складу покриття (Ti, Cr)N: максимальне підвищення зносостійкості дрібнорозмірного ріжучого інструменту забезпечує багатокомпонентне композиційне нітридне покриття, що містить (85 % Ti та 15 % Cr).

7. Отримано, що покриття мають твердість в одношаровому варіанті – TiN – 23 - 25 ГПа, (Ti, Cr)N – 28 - 30 ГПа, а в багатошарових покриттях TiN-

CrN мають твердість 25 - 40 ГПа. Експерименти показують, що мікротвердість багатошарових нанопокриттів, що містять з'єднання із шарів з мікротвердістю ≥ 20 ГПа, збільшується приблизно у 2 рази, тобто досягає значень ≥ 40 ГПа.

8. Експериментальні дані покриттів Ti- Al-N та Ti-Zr-N показують, що на глобулярній поверхні, зі збільшенням товщини покриття, відбувається утворення розгалуженої системи вхідних кутів по межах напівсфер, що сприяє підвищенню швидкості формування покриття за вибраних умов і проявляється в огрубленні будови глобул, в покритті їх поодинокими (Ti-Zr-N) та численними (Ti- Al-N) псевдогранями (100).

9. Було досліджено закономірності тертя та зносу покриттів на основі TiN, нанесених на швидкорізальну сталь Р6М5, в умовах фрикційного контакту зі сталлю 45. Спостерігається зростання коефіцієнта тертя зі збільшенням навантаження під час випробувань сталі Р6М5 без покриття та деяке зниження – при випробуваннях покриття з мастилом. Загальним як при терті по покриттях, так і по сталі Р6М5 без покриття є те, що мінімальні значення коефіцієнта тертя спостерігаються при змашуванні мастилом, максимальні – при сухому терті.

РОЗДІЛ 4

ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

4.1 Стан економічних можливостей та прогнозованості реалізації пізнавального експерименту з погляду ресурсозбереження

Наше дослідження відноситься до виготовлення поверхонь деталей, що покращують їх умови експлуатації та наступному дослідженню заданих наноструктурваних нітридних покриттів на поверхні деталі. Отримані покриття можуть бути використані в широкому спектрі матеріалознавства.

Якісне захисне покриття себе зарекомендувало саме на основі TiN, TiAlN, TiCrN, TiAlN, TiZrN, тому мають гарні хімічні та механічні властивості, тому зараз широко використовується на виробництві. Нанесення плазмових покриттів диференційованого хімічного складу із заздалегідь заданими фізико-механічними властивостями та структурою допускає модифікувати поверхню деталей, змінюючи їх теплові, антикорозійні, зносостійкі та інші параметри. Тому постає питання розробки системи автоматизованого проектування технологічного процесу шліфування плазмових покриттів, щоб не було тріщини, сколів та інших пошкоджень нанесеного покриття від поверхні деталі.

Проаналізувавши дану інформацію, ймовірними користувачами є організації, підприємства, а ще фізичні особи. Цими підприємствами можуть бути: заводи з машинобудування, фабрики, крамниці з виробами з металу.

4.2 Ініціація проєкту та економічні розрахунки

В цьому розділі наведено інформацію про зацікавлені сторони існуванні проєкту і їх очікування від реалізації проєкту [49].

Сторони, які зацікавленні в отриманні результатів проєкту наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Зацікавлені сторони проєкту

Зацікавлені сторони проєкту	Очікування зацікавлених сторін
Університет	Наявність НДДКР
Студент	Захист магістерської роботи, отримання диплому про вищу освіту
Підприємства, що займаються виготовлення деталей і механізмів	Велика продуктивність. Розширити номенклатуру оброблюваних виробів. Великий попит.
Споживачі	Низька вартість виробів в порівнянні з виробами отриманими стандартними методами. Якість покриття.
Держава	Можливість використання для імпортозаміщення

Для обґрунтування економічної ефективності досліджуваних наноструктурованих нітридних покриттів на основі Ti, Ti-Zr, Ti-Al, Ti-Cr, осаджених методом магнетронного розпилення на установці ВУП-5М, які проводили на зразках із швидкорізальної сталі Р6М5 (масою 150 г) [56].

Магнетронне розпилення нітридних покриттів на основі Ti, Ti-Zr, Ti-Al, Ti-Cr:

Основні параметри магнетронних систем іонного розпилення [52]:

- питома швидкість розпилення – $(4-40) \cdot 10^{-3} \text{ г}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$;
- ефективність процесу генерації (по міді) – $2 \cdot 10^{-4} \text{ г}/\text{Дж}$;
- енергія генеруючихся частинок – 20 – 30 еВ;
- енергія зарожених частинок – 0,3 – 10,0 еВ;
- швидкість осадження покриттів – 20 – 40 нм/с;
- робочий тиск – $(6 - 60) \cdot 10^{-4} \text{ Па}$;
- вартість устаткування приймаємо рівною – 20000 грн;
- площа, яку займає устаткування – 4,35 м².

Вартість матеріалу зразка:

$$C_m = (Q \cdot C_m) \cdot a \quad (4.1)$$

де Q – норма витрати матеріалу (маса заготовки), кг;

$Q_{\text{зразка}} = 0,2$ кг.

C_m – ціна матеріалу заготовки в грн.; для сталі Р6М5 – 98 грн./кг.

a – коефіцієнт, що враховує витрати на термообробку (умовно приймаємо 1,5).

Для досліджуваних покриттів вартість матеріалу зразка буде однаковою:

$$C_m = ((0,2 \cdot 98)) \cdot 1,5 = 29,4 \text{ (грн.)}$$

Основна і додаткова зарплата виробничого робітника з відрахуваннями на соціальне страхування та до інших фондів (за виконувану операцію):

$$Z_p = C_{\text{ч}} \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot t_{\text{ум.}} / 60 \cdot K_{\text{мн}} \cdot n \quad (4.2)$$

де $C_{\text{ч}}$ – годинна тарифна ставка відповідного розряду, грн. (приймаємо IV розряд: ставка 23 грн./год.);

K_1 – коефіцієнт, що враховує додаткову зарплату (приймаємо $K_1 = 1,8$);

K_2 – коефіцієнт, що враховує багатостатне обслуговування (приймаємо $K_2 = 1,432$);

$t_{\text{ум.}}$ – час на операцію для однієї заготовки (партії), хв.;

$K_{\text{мн}}$ – коефіцієнт, що враховує обслуговування кількома одиницями обладнання; приймаємо $K_{\text{мн}} = 1$;

n – кількість одиниць обладнання на даній операції, шт.[50].

Конденсування нітридних покриттів на основі TiN, TiAlN, TiCrN, TiAlN, TiZrN осаджених методом магнетронного розпилення:

$$Z_p = 22 \cdot 1,8 \cdot 1,432 \cdot 0,5 \cdot 1 \cdot 1 = 28,35 \text{ (грн.)}$$

Конденсування CrN/WN осаджених методом магнетронного розпилення:

$$Z_p = 27 \cdot 1,8 \cdot 1,432 \cdot 0,75 \cdot 1 \cdot 1 = 52,19 \text{ (грн.)}$$

Конденсування WCrN осаджених методом магнетронного розпилення:

$$Z_p = 28 \cdot 1,8 \cdot 1,432 \cdot 0,75 \cdot 1 \cdot 1 = 54,12 \text{ (грн.)}$$

Амортизаційні відрахування по обладнанню, віднесені на даний метод:

$$A_0 = \frac{S_0 \cdot K \cdot a \cdot n}{N_{\text{год}} \cdot 100} \quad (4.3)$$

де S_0 – вартість одиниці обладнання, грн.;

K – коефіцієнт, що враховує витрати на транспортування і монтаж устаткування; приймаємо $K = 1,25$;

a – норма амортизаційних відрахувань (10% від вартості обладнання);

n – кількість одиниць обладнання на даній операції, шт.;

$N_{\text{год}}$ – річна програма експериментальних зразків, шт. (приймаємо 1200 шт.)

$$A_0 = \frac{40000 \cdot 1,25 \cdot 4000 \cdot 1}{1200 \cdot 100} = 2000,00 \text{ (грн)}$$

Витрати на ремонт обладнання приймаємо укрупнено пропорційно величині амортизаційних відрахувань: величині амортизаційних відрахувань:

$$P = A_0 \cdot K, \quad (4.4)$$

де K – коефіцієнт, що встановлює залежність величини витрат на ремонт від величини амортизаційних відрахувань (приймаємо варіант 17 %)

$$P = 2000,00 \cdot 1,7 = 3400 \text{ (грн.)}$$

Витрати на утримання виробничої площі:

$$P_{\text{утр.}} = \frac{S_{\text{пл.}} \cdot K \cdot n \cdot P}{N_{\text{річ.}}}$$

де $S_{\text{пл.}}$ – площа, безпосередньо, яку займає одиниця обладнання, м²;

K – коефіцієнт, що враховує додаткову площу під проходи і проїзди;

n – кількість одиниць обладнання, шт.;

P – річна норма витрат за утримання одного метра квадратного виробничої площі, грн. (приймаємо 400 грн.);

$N_{\text{річ.}}$ – річна програма зразків, шт. [51].

$$P_{\text{утр.}} = \frac{5,25 \cdot 4 \cdot 1 \cdot 400}{1000} = 8,04 \text{ (грн)}$$

Загальні результати розрахунів наведено у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2

Технологічна собівартість нанесення покриття, грн.

Найменування елементів витрат	Покриття нанесені магнетронним методом			
	TiN	TiAlN	TiCrN	TiZrN
Основна і додаткова заробітна плата робітника	28,35	28,35	54,12	52,19
Амортизаційні відрахування по обладнанню	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00
Витрати на ремонт обладнання	3400,00	3400,00	3400,00	3400,00
Витрати на утримання виробничої площі	8,04	8,04	8,04	8,04
Загальна сума	5436,39	5436,39	5462,16	5460,23

Висновки

Промисловість в наш час вимагає зростання товщини від декількох нанометрів до кількох мікрометрів. Зазвичай характеристики покриття змінюються зі зменшенням продуктивності поверхні деталей. В результаті швидкість різання і подачі повинна бути вище. Крихким вважається матеріал ріжучої частини інструменту. Тому захисне покриття на основі системи TiN, TiAlN, TiCrN, TiAlN, TiZrN покращує термостабільність і стійкість до окислення.

В даний час конфігурації наносяться зносостійких покриттів можуть бути абсолютно різні. Тому застосовуються нітридні, складні композиційні та складові покриття з включенням атомів додаткового матеріалу. Саме зміна технологічних параметрів і концентрацій розпилюються речовин в мішені дозволяють отримувати одношарові і багатшарові структури.

Четвертий розділ містить в собі розрахунок собівартості при конденсуванні досліджуваних покриттів за наступними складовими: основна та додаткова заробітна плата працівника, відрахування на амортизацію обладнання та його ремонт, витрати на допоміжні матеріали, утримання виробничої площі і силову електроенергію. За результатами для серії зразків із 1200 шт. вартість нанесення нітридних покриттів на основі TiN, TiAlN, TiCrN, TiAlN, TiZrN на установці ВУП-5М становить 5436,39 грн., 5462,16 грн. та 5460,23 грн відповідно.

РОЗДІЛ 5

ОХОРОНА ПРАЦІ, ДОВКІЛЛЯ І ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ

5.1 Основні види небезпек при роботі на вакуумних установках

При експлуатації вакуумних установок виділяють фізичні та хімічні та психофізіологічні небезпеки. До останніх відноситься монотонність праці, тобто навантаження на психічний стан людини [53].

До хімічних відноситься: шкідлива дія токсичних речовин на організм; вибухи; хімічні, гомогенні та гетерогенні реакції; реакції, що можуть виникати раптово, коли гази та інші матеріали контактують з хімічними реакціями (при виході атмосферного кисню з камери токсичних речовин, або навпаки, при потраплянні всередину); окислювачі утворюють зайвий тиск в насосі, можуть зайнятися [54].

До фізичних можна віднести: підвищення тиску через потрапляння газу в установку; різке підвищення температури летючого газу; фазовий перехід; непрохідність випускного трубопроводу; реакція у вакуумній установці. Причиною стиснення тиску в трубопроводі насосу є подавання стиснених газів, при виключеній насосній установці. Тому якщо компоненти вхідного трубопроводу несправні для створення тиску, буде просочування газу з вакууму через прорив трубопроводу [54].

Небезпека при роботі з вакуумними установками може характеризуватися знищенням вакуумних посудин під діяльністю атмосферного тиску. У випадку кришталевих посудин, ймовірно утворення травми обломками скла. Застережливим заходом є розташування посудин за пластинчастим екраном чи сіткою з металу. Ймовірність вибуху обумовлена вибуховими сумішами, що виникають із рештків пари та газів, що включає в себе водень, як наприклад, зварюючи відмиті, але не провітрені посудини чи використовуючи рідкий кисень в охолоджуваних сітках, що стоять поруч з входом до масляного насоса.

Отже, незважаючи на окремі попередні, є небезпеки, що відносяться до прикладання високої напруги, а ще вибухових і отруйних речовин, що зобов'язує вимоги до даної техніки безпеки.

5.2 Загальні вимоги безпеки при експлуатації електроустаткування та вакуумних насосів

Всі устаткування та машини, які використовують в електроустановках, обов'язково необхідні бути в гарному і повноцінному робочому стані, а також перевірені за всіма вимогами згідно з дієвими нормативними документами і термінами їх справності. Електроустаткування, всі комплектувальні деталі повинні відповідати вимогам безпеки при експлуатації окремих нормативних актів на території України, і мати відповідні сертифікати відповідності якості з визнанням закордонного сертифіката.

Старша людина, яка відповідає за техніку безпеки обладнання зобов'язана створити умови для збереження, обслуговування та транспортування технічних установок згідно з дієвими документами. Йому необхідно: обрати провідного фахівця, який буде відповідати за стан справності і експлуатацію установок з відома керівників приміщення, які пройшли навчання та володіють пристроями; надати достатню кількість робітників; запровадити інструкції з охорони праці для всього персоналу [55].

Необхідно надати відповідальність на робочих, які обслуговують електрообладнання, контролювали за їх справністю – обстеження, випробування справності, перевірки; проводити пакет навчання та іспити для працюючих у відповідні терміни згідно з вимогами Правил технічної експлуатації електроустановок споживачів; реалізувати протиаварійні та профілактичні перевірки електрообладнань відповідно до загальних норм; надати випробування техогляду електроустаткування [57].

При роботі обладнання з напругою менше 1000 В, не знімаючи напруги на струмових з'єднаннях або поруч слід: відокремити струмові частини від робочої поверхні; стояти на діелектричній поверхні та працювати тільки в ЗІЗ (нові, непошкоджені рукавички з лаковим покриттям, взуття діелектричне).

До праці з вакуумними насосами дозволяється допуск тільки повнолітнім особам, які повністю пройшли інструктаж та медичний огляд. Працюючий з вакуумними установками повинен: знати та реалізовувати засоби індивідуального та колективного захисту; додержуватися правил з охорони праці.

Перед початком роботи на вакуумній установці слід перевірити справність всіх складових. Щоб надати незагрозливу експлуатацію насоса потрібно: завжди контролювати кількість масла; один раз на тиждень доповнювати вакуумне масло; іноді зводити з штучної ємності воду, що збіглася; періодично перевіряти за остиганням, щоб не перегріти насос; контролювати за температурою електродвигуна (його поверхнею); пильнувати за ступенем вібрації [55].

5.3 Заходи поліпшення умов праці обслуговуючого персоналу

Покращити працю робітників можна створивши комфортні умови, упорядкувавши ревізію за дотриманням окремих стандартів, які налаштовують передумови праці, а ще впровадивши заходи щодо захисту від шкідливого впливу.

Створення сприятливих умов під час праці здобувається шляхом вентиляції, повітряного душу, установки кондиціонерів, і ще окремих технічних засобів захисту від холоду і тепла, наприклад, з споживанням теплоізоляційних матеріалів [57].

Людський організм підлягає сприянню окремих фізичних характеристик атмосфери, таких, як випари, конвекція і випромінювання. Дані властивості збільшують власний вплив під діяльністю більшої вогкості

та швидкості руху кисню, який змінює потужність віддачі тепла організмом, так як зберігає збільшену теплопровідність. Щоб стан вологості повітря в металургійних установах покращився, в результаті опрацьовується система заходів.

Вібрація та шум також вважаються показниками, які негативно впливають на умови праці. Щоб знизити рівень шуму, а ще зменшити проміжок часу, протягом якого робітник піддається впливу шуму більше ніж на 85 децибел, тому для покращення умов праці слід користуватися ЗІЗ для вух. Щоб прибрати вібрації треба завжди керувати над її щабелем на робочих зонах і застосовувати належні критерії захисту. Також для покращення умов праці застосовують технологічні й керівницькі опрацювання, використовуючи окремі ізолятори [56].

Пагубно діють на умови праці засмічення атмосфери в робочих зонах в результаті формування аерозолей, а саме висячих у повітрі часток твердої чи рідкої речовини як результатів перебування горіння чи плавлення. Для проєкції простого становища повітряного середовища приміщень необхідні заходи для покращення умов і очищення.

Актуальними заходами є новітні першосортні технології виробництва, де проводиться робота з локалізуванню достачання забруднюючих речовин в атмосферу, а також встановлення суворої ревізії за максимально допустимими концентраціями речовин у атмосфері, покращуються робочі обладнання та інструменти, запроваджуються засоби індивідуального й колективного захисту робітників [56].

Отже, керівництво підприємства обов'язково повинні надати робітникам умови для збереження здоров'я і незагрозливі умови праці. Тому вступають в дію інноваційні засоби техніки безпеки, які застерігають виробничий травматизм, а також надають санітарно-гігієнічні умови, що попереджують професійні захворювання [57].

5.4 Контроль стану навколишнього середовища і засоби з охорони довкілля

Контроль викидів індустриальних установ виконують шляхами вимірювання зосередженості шкідливих речовин та об'ємів газоповітряної суміші, де виникає викид. Огляд ведеться під час роботи устаткування в режимі робочої дії, а за нестабільної роботи — в проміжок найбільш граничного викиду речовин. Особливою складовою створення якісного навколишнього середовища є порядок ревізування його обставин, томі слід прогнозувати зміни та зважати на його стан [55].

Особливим в забезпеченні стану середовища являється комплекс ревізування його угруповання та загального стану, який містить в собі: контроль за станом навколишнього середовища та передбачення перемін; прояв та експертиза осередків забруднення; застереження щодо виникнення високого ступеня забруднень [57].

Ці пости зобов'язані поліпшувати прояв щонайбільших зосереджень нечистотних ресурсів. Їх звичайно розміщують своєрідними сферами у місцях сплітання з кільцевими лініями, що вказують на бік світу. Посередині міститься початок забрудненості, що має радіус.

Стаціонарні спостереження потрібні для постачання невпинного фіксування речовин, що забруднюють (пилу, CO, TiO₂, і т.п.), а також постійних проб атмосфери для наступних розглядів.

Маршрутний потрібний для того, щоб систематично обирати проби повітря в деяких місцях за непостійним розкладом. Пересувний потрібний для того, щоб вибору проби, що знаходиться під газовим факелом. Вони мають рекувізуватися за вітром в місцях перехрещення діаметру факела та зосереджених кіл з радіусами [55].

Отже, контроль стану виконують спеціалізовані порядки контролю якості навколишнього середовища. Присутність постійного оповіщення щодо стану повітря у приміщеннях цехів дає змогу без зважань пускати в обіг

потрібні заходи для ліквідування через мірних забруднень, скорочуючи викиди отруйних індустриальних підприємств.

На металургійних підприємствах значну увагу надають проведенню повноцінних ремонтів дійсних машин, установку сучасного устаткування, підіймають питання з охорони праці. Формують устрої газоочищення, які дають змогу сповільняти приблизно 98% токсичних викидів. Під час виготовлення виробів відбувається утилізація відходів. Газові викиди з надмірним вмістом SO_2 застосовують для отримання H_2SO_4 . Якщо менше значення оксиду сірки, його утилізують, роблячи хімічну реакцію з CaCO_3 у присутності O_2 . Тому для охорони довкілля в металургії важливу роль відіграє створення технологій систематичного використання матеріалу.

Отже, проблеми, які пов'язані з охороною навколишнього середовища актуальні для підприємств з виробництва матеріалів, які викидають в атмосферу шкідливі речовини. Контролювати заперечливе позначення дії виробництва середовище слід з сприянням порядку механічних установок та виробів, контролю їх процедур з охорони навколишнього середовища. Покращений устрій виробничих цехів з виробництва виробів прогнозує розподіл відповідних дій, що виконуються у виробництві, на окремі види з ціллю покращити контроль забруднення атмосфери.

Висновки

За допомогою електроустановок та вакуумних насосів можна отримати покриття високої якості і чистоти, з заданими параметрами і необхідними властивостями. Таке обладнання найменше впливає на навколишнє середовище, бо отримання покриттів проводяться у вакуумі. Дані техніки не вимагають присутності вартісного обладнання та дуже великих затрат енергії. В результаті чого виробництво стає економним, а деталі отримують знижену собівартість.

Вакуумні установки показали, що вони можуть надавати якісний рівень фізико-механічних характеристик матеріалів на поверхнях деталей, дають змогу наносити щільні покриття з тугоплавких хімічних поєднань, а ще алмазоподібних, які звичайними методами не вдається одержати. Вони гарантують високе зчеплення покриття до підкладки, в результаті дають рівномірні покриття без дефектів та нерівних пропорцій, поверхня покриття забезпечена високою чистотою, що екологічно важливо для виробництва.

Створення сприятливих умов під час праці здобувається шляхом вентиляції, повітряного душу, установки кондиціонерів, і ще окремих технічних засобів захисту від холоду і тепла, наприклад, з споживанням теплоізоляційних матеріалів

Особливим в забезпеченні стану навколишнього середовища являється комплекс ревізування його угруповання та загального стану, який містить в собі: контроль за станом навколишнього середовища та передбачення перемін; прояв та експертиза осередків забруднення; застереження щодо виникнення високого ступеня забруднень.

Можна зробити висновок, що наука не стоїть на місці та захисні покриття постійно вдосконалюються, щоб покращити свої якісні характеристики, адже вимоги, які висуваються до металообробної техніки є значущими для розвитку нових теорій та методик.

ВИСНОВКИ

1. За допомогою методу реактивного магнетронного розпилення було отримано покриття із різних матеріалів і різного складу, що робить цей метод одним із перспективних для фізичного осадження матеріалів.

2. Досліджені в роботі покриття TiN є щільними, мають низьку поверхневу пористість та малий вміст краплинної фази α -Ti, при всіх режимах напилення формується покриття зі стовпчастою структурою зерен TiN. Встановлено тенденцію зменшення розміру зерен при зниженні струму дуги та тиску реакційного газу в камері.

3. Фазовий аналіз отриманих покриттів (TiCr)N показує, що вони складаються з твердого розчину Cr у нітриді титану. У покриттях присутні також α -Ti та Cr. (Ti, Cr)N – покриття, що має вищий опір окисленню і зберігає свої властивості при більш високих температурах порівняно з покриттями TiN та CrN. Для покриття (Ti, Cr)N характерна значна стабілізація мікротвердості за часом. Ефективність зміцнення даним покриттям залежить від розмірів інструменту, що зміцнюється. Максимальне підвищення зносостійкості дрібнорозмірного ріжучого інструменту забезпечує багатокомпонентне композиційне нітридне покриття, що містить (85 % Ti та 15 % Cr).

4. Експериментальні дані покриттів Ti-Al-N та Ti-Zr-N показують, що на глобулярній поверхні, зі збільшенням товщини покриття, відбувається утворення розгалуженої системи вхідних кутів по межах напівсфер, що сприяє підвищенню швидкості формування покриття за вибраних умов і проявляється в огрубленні будови глобул, в покритті їх поодинокими (Ti-Zr-N) та численними (Ti-Al-N) псевдогранями (100).

5. Було досліджено закономірності тертя та зносу покриттів на основі TiN, нанесених на швидкорізальну сталь Р6М5, в умовах фрикційного контакту зі сталлю 45. Спостерігається зростання коефіцієнта тертя зі збільшенням навантаження під час випробувань сталі Р6М5 без покриття та

деяке зниження – при випробуваннях покриття з мастилом. Загальним як при терті по покриттях, так і по сталі Р6М5 без покриття є те, що мінімальні значення коефіцієнта тертя спостерігаються при змащуванні мастилом, максимальні – при сухому терті.

6. Отримано, що покриття мають твердість в одношаровому варіанті – TiN – 23 - 25 ГПа, (Ti, Cr)N – 28 - 30 ГПа, а в багатошарових покриттях TiN-CrN мають твердість 25 - 40 ГПа. Експерименти показують, що мікротвердість багатошарових нанопокриттів, що містять з'єднання із шарів з мікротвердістю ≥ 20 ГПа, збільшується приблизно у 2 рази, тобто досягає значень ≥ 40 ГПа.

7. Наносарова структура з обмеженими зернами нітридів в нано-діапазоні була сприятлива для підвищення механічних характеристик для багатошарового покриття.

8. Економічний розділ містить в собі розрахунок собівартості при розпиленні досліджуваних покриттів за наступними складовими: основна та додаткова заробітна плата працівника, відрахування на амортизацію обладнання та його ремонт, витрати на допоміжні матеріали, утримання виробничої площі і силову електроенергію.

9. За допомогою електроустановок та вакуумних насосів можна отримати покриття високої якості і чистоти, з заданими параметрами і необхідними властивостями. Таке обладнання найменше впливає на навколишнє середовище, бо отримання покриттів проводяться у вакуумі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Bhatt P. Nanostructured Coating Improves Properties of Metal / Bhatt P., Shah H. N. Journal of Modern Chemistry & Chemical Technology. 2015. Vol. 6, 3. DOI: 10.13140/RG.2.2.25719.11686.
2. Хільчевський В. В. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів: Навчальний посібник. К.: Либідь, 2014. — 328 с. ISBN 966-06-0247-2.
3. Усов А. В. Розробка сапр технологічного процесу шліфування плазмових покриттів / Усов А. В., Тонконогий В. М., Рибак О. В. // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. — 2018. № 1 (43), 188.
4. Chen X. Microstructure and Microhardness of Ni/Al-TiB₂ Composite Coatings Prepared by Cold Spraying Combined with Postannealing Treatment / Chen X., Li C., Xu S., Hu Y., Ji G., Wang H. // Coatings. — 2019. Vol. 9, 565. DOI:10.3390/coatings9090565.
5. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство. Практикум: [навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. за напрямом «Інж. механіка»] / В. В. Попович, А. І. Кондир, Е. І. Плешаков та ін. — Львів: Світ, 2019. — 551 с. — ISBN 978-966-603-401-7.
6. Дерев'янка І.С., Стан і аналіз сучасних методів підвищення надійності деталей машин поверхневим зміцненням / Дерев'янка І.С./ Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра технології машинобудування. — Львів, 2017. — 36 с.
7. HanLiu., MinhengYe., ZuoyanYe., LiliWang., GuoweiWang., XianfengShen., PingXu. Surface and Coatings Technology. Volume 443, 15 August 2022, 128608.
8. Методи поверхневого зміцнення у процесі виготовлення деталей машин: навч. посіб. / А. Г. Фесенко та ін. — Д.: РВВ ДНУ, 2015. — 104 с.
9. Погребна Н.Е., Куцова В.З., Котова Т.В. Способи зміцнення металів: Навчальний посібник. — Дніпро: НМетАУ, 2021. - 89 с.

10. Рожков О.Д. Технологія нанесення покриттів. Частина II: Навч. посібник. – Дніпро: НМетАУ, 2018. - 38 с.
11. Wenlei Shan., Shohei Ezaki /Thin Solid Films/ Volume 763, 1 December 2022, 139575
12. TongLiu., HongyanJin., LeileiXu., ZengliHuang., HaijunChen., MutongNiu., YanliDing., YaoMa. Transmission electron microscopy sample preparation method for micrometer-sized powder particles using focused ion beam. Volume 143, April 2021, 103030; <https://doi.org/10.1016/j.micron.2021.103030>.
13. Latushkina S., Kuis D., Posylkina O. Synthesis of Al-Ti-Fe-Cr-Ni-N protective coatings by the method of vacuum-arc deposition from a separated vacuum flow. Volume 303, 15 November 2021, 130527. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.130527>.
14. ZhiyuanWang., YanfeiHuang., LeiZhang., JieZhou., DebinShan., HaidouWang., ZhiguoXing., Applied Surface Science. Volume 606, 30 December 2022, 154853. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.154853>.
15. LinLin., Liang Wang., Yakai Bai., Xipeng Lin., Shuang Zhang., Zhiwei Ge., Long Peng., Haisheng Chen. Applied Thermal Engineering. Volume 219, Part A, 25 January 2022, 119415. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119415>.
16. Ngetich G. K., Tzu T. L., Rotich S. K., Jyh W. L., Shih-H. C. Surface and Coatings Technology Volume 449, 15 November 2022, 128988.
17. Yasudaa K., Ohtsua Y., Schulzeb J. Vacuum. Volume 202, August 2022, 111184.
18. Donald M. Mattox. Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing (Second Edition) Pages 157-193, 2010.
19. Klopotov A.A., Ivanov Yu.F., Potekaev A.I., Abzaev Yu.A., Kalashnikov M.P., Chumaevskii A.V., Volokitin O.G., Teresov A.D. Surface and Coatings Technology. Volume 389, 15 May 2020, 125576.
20. Jon Tomas Gudmundsson., Daniel Lundin. High Power Impulse Magnetron Sputtering. 2020, Pages C. 1-48.

21. Колубаєв А.В. Структура і механізми деформування і руйнування твердих покриттів в умовах фрикційної взаємодії / Колубаєв А.В., Бєлий А.В., Буяновський І. А., Колубаєв Е. А., Кукареко В. А., Сизова О. В., Хрущов М. М. // Стаття: програми фундаментальних наукових досліджень державних академій. —2019. — Т. 62. № 8. С. 52-80. DOI: 10.17223/00213411.

22. Parviz Mohamadian Samim. Nanoscale architecture of ZrN/CrN coatings: microstructure, composition, mechanical properties and electrochemical behavior / Parviz Mohamadian Samim, Arash Fattah-alhosseini, Hassan Elmkhah, Omid Imantalab // Journal of Materials Research and Technology. 2021. Vol. 15. Pages 542-560. Crossref DOI link: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.08.018>.

23. Pogrebnjak A. Microstructure, physical and chemical properties of nanostructured (TiHfZrNb)N coatings under different deposition conditions / Pogrebnjak A., Yakushchenko I., Bagdasaryan A., Bondar O., Krause-Rehberg R., Abadias G., Chartier P., Oyoshi K., Takeda Y., Beresnev V., Sobol O. Materials Chemistry and Physics. 2014. Vol. 147, 1079-1091. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2014.06.062.

24. Ul-Hamid A. Synthesis, microstructural characterization and nanoindentation of Zr, Zr-nitride and Zr-carbonitride coatings deposited using magnetron sputtering // Journal of Advanced Research. 2020. Vol 9. Pages 107-119. Crossref DOI link: <https://doi.org/10.1016/j.jare.2020.11.010>.

25. Васильєв В.В. Структура и властности нитридных покриттів, обложених із фільтрованої вакуумно-дугової плазми з використанням порошкового катоду Cr_{0,5}Al_{0,5} / В. В. Васильєв, Лучанинов А. А., Решетняк Е. Н., Стрельницький В. Е., Толмачєва Г. Н., Прибитков Г. А., Коржова В. В // Журнал фізики і інженерії поверхні. – 2016. – Т. 1. – № 1. – С. 62-80.

26. Azhari I. El. Contact damage investigation of CVD carbonitride hard coatings deposited on cemented carbides / Azhari I. El., García J., Soldera F., Suarez S., Jiménez-Piqué E., Mücklich F., Llanes L. // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. — 2019. — Crossref DOI link: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2019.105050>.

27. Kuo Chin-Chiuan. High Temperature Wear Behavior of Titanium Nitride Coating Deposited Using High Power Impulse Magnetron Sputtering / Kuo Chin-Chiuan., Lin Yu-Tse., Chan Adeline and Chang Jing-Tang // Coatings. 2019. Vol. 9, 555. DOI:10.3390/coatings9090555.

28. Говорун Т.П. Методика отримання та властивості зносостійких покриттів на основі Ti і N та Ti, Al і N / Говорун Т. П., Пилипенко О. В., Говорун М. В., Дядюра К. О. // Журнал нано- та електронної фізики. — 2017. — том 9. — № 2. — С. 1-7. DOI: 10.21272/jnep.9(2).02026.

29. Тлеукенов Е-Т. О. Вплив умов осадження нітридних покриттів (Ti, Zr, Hf, V, Ta, Nb) N на їх мікроструктуру і фізико-механічні властивості: дис. ...технічна фізика: 6D072300. Усть-Каменогірськ. 2017. 4-6 с.

30. Pogrebnjak A. Nanocomposite Multilayer Binary Nitride Coatings Based on Transition and Refractory Metals: Structure and Properties / Pogrebnjak A., Smyrnova K., Bondar O. Coatings. 2019. Vol. 9, 155. DOI:10.3390/coatings9030155.

31. Gaoa Z. A conformable high temperature nitride coating for Ti alloys / Gaoa Z., Zhanga Z., Zhanga X., Kulczyk-Maleckab J., Liua H., Kellyb P., J. Withersa P., Xiao P. Acta Materialia. 2020. Vol. 189, 274-283. DOI: 10.1016/j.actamat.2020.02.051.

32. Ul-Hamid A. Deposition, microstructure and nanoindentation of multilayer Zr nitride and carbonitride nanostructured coatings // Scientific Reports. 2022. Vol. 12. Article 5591. Crossref DOI link: <https://doi.org/10.1038/S41598-022-09449-6>.

33. Zhang Z. Mapping the mechanical properties in nitride coatings at the nanometer scale / Zhanga Z., Chena Z., Holecb D., Liebscher C., Koutna N., Bartosikd M., Zhenga Y., Dehmc G., Mayrhofer P. // Acta Materialia. — 2020. — Vol.194. Pages 343-353. Crossref DOI link: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.04.024>.

34. Maksakova O.V. Features of Investigations of Multilayer Nitride Coatings Based on Cr and Zr / Maksakova O.V., Beresnev V.M., Pogrebnyak O.D. // Prog. Phys. Met. 2018. Vol. 19. № 1, 25-48. DOI : 10.15407/ufm.19.01.025.

35. Соболев О. В. Вплив потенціалу зміщення і тиску азоту на структурно-напружений стан і властивості нітридних покриттів, отриманих випаруванням високоентропійних сплавів вакуумно-дуговим методом / О.В. Соболев, А.А. Андреев, В.М. Воєводін, В.Ф. Горбань, С.М. Григор'єв, М.А. Волосова, І.В. Сердюк // Питання атомної науки і техніки. — 2014. — № 1. — 141-146 с.

36. Горбань В.Ф. Структурний стан та властивості нітридних покриттів на основі високоентропійного сплаву $Ti_{30}Zr_{25}Nb_{20}Hf_{15}Ta_{10}Y_5$ / Горбань В. Ф., Андреев А.О., Карпець М. В., Столбовий В. А., Канцир О. В., Рокицька О. А., Бужинець О. І. // Надтверді матеріали. — 2018. № 1. С. 30-35.

37. Загребельний В. В. Технологічне забезпечення підвищеної зносостійкості швидкорізальної сталі Р6М5 комбінованими методами поверхневого зміцнення: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.04 / Загребельний В. В. — Київ, 2018. 2-5 с.

38. A. Pogrebnyak, V. Ivashchenko, O. Maksakova, V. Buranich, P. Konarski, V. Bondariev, P. Zukowski, P. Skrynskyu, A. Sinelnichenko, I. Shelest, N. Erdybaeva, P. Galaszkiwicz, T.N. Koltunowicz, Comparative measurements and analysis of the mechanical and electrical properties of Ti-Zr-C nanocomposite: Role of stoichiometry, Measurement. 176 (2021) 109223.

39. Panov D. O., Simonov Yu. N., Leont'ev P. A., Smirnov A. I. and Zayats L. Ts. A study of phase and structural transformations of hardened low-carbon steel under conditionsof multiple intense heat effect // Metal Science and Heat Treatment, Vol. 54, Nos. 11 – 12, March, 2013. P. 582-586.

40. Vereschaka Alexey. Improvement of working efficiency of cutting tools by modifying its surface properties by application of wear-resistant complexes. Advanced Materials Research, Vols.712-715 (2014) Trans Tech Publications, p.347-351.

41. Mattox D.M. Handbook of physical vapor deposition (PVD) processing / D.M. Mattox. – William Andrew, 2014.
42. Lang F.C., Zhao Y.R., Xing Y.M., Liu F., Hou X.H., Zhu J. Optics and Lasers in Engineering. Volume 86, November 2016, Pages 281-290.
43. Hao Li; Hongshuai Cao, Jiao Yang, Yuanhang Li, Fugang Qi, Nie Zhao, Xiaoping Ouyang. Materials Characterization. Volume 194, December 2022, 112421.
44. Cong Qiuzi, Yu Xiang and He L. Fundamentals of X-Ray Phase Analysis 34-41 Pages. Doi: 10.2174/978160805076511101010034.
45. В.А.Ліопо, В.В.Война. Рентгенівська дифрактометрія: Навч. посібник / В.А.Ліопо, В.В.Война. - Гродно: ГрДУ, 2014. – 19-24 с.
46. Lesley Graham , Jan Marc Orenstein. Transmission electron microscopy in research: Article/Lesley Graham , Jan Marc Orenstein. 04 October 2017.
47. Методичні вказівки до лабораторної роботи з теми "Дослідження поверхні матеріалів із використанням сканувального тунельного та атомно-силового мікроскопів" із дисципліни "Фундаментальні основи нанотехнологій" [Текст] : для студ. спец. 132 "Матеріалознавство" усіх форм навчання / Т. П. Говорун, О. П. Гапонова, Х. В. Берладір. – Суми : СумДУ, 2020. – 22 с.
48. Pogrebnyak A.D. Influence of thermal annealing and deposition conditions on structure and physical-mechanical properties of multilayered nanosized TiN/ZrN coatings / A.D. Pogrebnyak, O.V. Bondar, N.K. Erdybaeva, S.V. Plotnikov, P.V. Turbin, S.S. Grankin, V.A. Stolbovoy, O.V. Sobol, D.A. Kolesnikov, C. Kozak // Przegląd elektrotechniczny. - 2015. – No. 12. – P. 228-232.
49. Прибуток підприємства: його роль, формування, розподіл та використання в умовах сучасної системи оподаткування [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу:

https://pidru4niki.com/15100827/finansi/pributok_pidpriyemstva_yogo_rol_formuvannya_rozpodil_vikoristannya_umovah_suchasnoyi_sistemi_opodatkuvan.

50. Багацька К. В. Фінансовий аналіз / К. В. Багацька, Т. А. Говорушко, О. О. Шеремет. - К.: Видавничий дім «АртЕк», 2014. – 320 с.

51. Сук Л.К. Фінансовий облік: Навчальний посібник / Л.К. Сук, П.Л. Сук – третє видання, перероблене і доповнене – К.: Знання, 2016. – 663 с.

52. Методичні вказівки до виконання економічної частини дипломної роботи спеціаліста для студентів спеціальності 7.092203 «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод» і 7.09206 «Електричні машини і апарати» денної і заочної форми навчання Факультету Електроенерготехніки і автоматики / Укл. О.О. Кожемяченко. – Київ: НТУУ «КПІ», - 2013 р. – 14 с.

53. Жидецький В.Ц. Основи охорони праці / В.Ц. Жидецький – Львів : Афіша, 2012. – 318 с.

54. Вакуумний насос і вакуумні системи. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.edwardsvacuum.com/content/dam/brands/edwards-vacuum/edwards-website-assets/corporate/documents/safety-manual/P40040857%20>.

55. СанПіН 2.2.1/2.1.1.1278-03 «Гігієнічні вимоги до мікроклімату виробничих приміщень».

56. Гончаренко М.Л. Тимофєєва А.В Оптимізація витрат як фактор підвищення рентабельності виробничого підприємства.- 2016. - №6. – С. 93-97.

57. Лекція 3. Розділ 2. Охорона праці. Тема 2.1. Вступ. Правові та організаційні основи охорони праці [Електронний ресурс].– Режим доступу до ресурсу: <http://opcb.kpi.ua/wp-content/uploads/2014/08/Binder21.pdf>.