

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка»

Механіко-машинобудівний факультет
Кафедра технологій машинобудування та матеріалознавства

До збірки
[Signature]

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
кваліфікаційної роботи ступеня магістра

Здобувача вищої освіти Дороша Дмитра Миколайовича
(п.б.)

академічної групи 131м-23н-1 ММФ
(шифр)

спеціальності 131 Прикладна механіка

за освітньо-науковою програмою «Наскрізний інжиніринг
машинобудівного виробництва»

на тему: «Ефективність механічної обробки корпусних деталей з
використанням сучасного інструменту»

Наказ ректора НТУ «Дніпровська політехніка» від 28.04.25 №317-с

Керівники	Прізвище, ініціали	Оцінка за шкалою		Підпис
		рейтинговою	інституційною	
кваліфікаційної роботи	Дербаба В.А.	85	добре	<i>[Signature]</i>
розділів:				
Аналітичний	Дербаба В.А.	83	добре	<i>[Signature]</i>
Технологічний	Дербаба В.А.	82	добре	<i>[Signature]</i>
Спеціальний	Дербаба В.А.	88	добре	<i>[Signature]</i>
Науково- дослідницький	Дербаба В.А.	86	добре	<i>[Signature]</i>
Рецензент	Кравченко Ю.Г.	82	добре	<i>[Signature]</i>

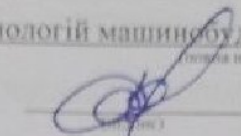
Встановлено, що матеріали даної кваліфікаційної роботи містять чутливу інформацію щодо реальних об'єктів критичної інфраструктури України, національної безпеки і оборони України, зокрема відомості про їх місце розташування, службове призначення, конструкторську і технологічну документацію, описи конструкторських матеріалів та їх властивості, іншу додаткову літературу та посилання. У зв'язку з чим такі матеріали не підлягають відкритому оприлюдненню та мають зберігатися відповідно до встановленого режиму закладом освіти.

[Signature] *[Signature]*

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

ЗАТВЕРДЖЕНО:
завідувач кафедри

технологій машинобудування та матеріалознавства



В.А. Дербабя
(підписати та прізвище)

« 18 » 01 2025 року

ЗАВДАННЯ на кваліфікаційну роботу ступеня магістра

здобувачу вищої освіти Дорошу Дмитру Миколайовичу
(прізвище та ініціали)

академічної групи 131М-23н-1 ММФ
(шифр)

спеціальності 131 Прикладна механіка

спеціалізації за освітньо-науковою програмою «Наскрізний інжиніринг
машинобудівного виробництва»

1 ПІДСТАВИ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ РОБОТИ

Наказ ректора НТУ «Дніпровська політехніка» від 28.04.25 №317-с

2 МЕТА ТА ВИХІДНІ ДАНІ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ РОБІТ

Об'єкт досліджень - процес механічної обробки деталі на верстаті з ЧПК.

Предмет досліджень - швидкість виконання поставлених завдань в середовищі САМ-програми Autodesk PowerMill, функціональні можливості системи, складність роботи програми і повнота баз даних інструменту.

Мета – ефективність використання інформаційних технологій на прикладі автоматизованої механічної обробки корпусної деталі на верстаті з ЧПК.

Вихідні дані для проведення роботи - 1) аналіз джерел інформації з питань режимних параметрів механічної обробки; 2) аналіз застосування інтерфейсу САМ-системи при виконанні конструкторських та технологічних задач; 3) визначення впливу режимів різання та стратегій фрезерної обробки на продуктивність і оптимальність керуючої програми для верстата з ЧПК.

3 ОЧІКУВАНІ РЕЗУЛЬТАТИ

Новизна - удосконалено підхід до оцінки стратегій (траєкторій)

фрезерної обробки деталі в САМ-системі Autodesk PowerMill та створення методики залежності основного часу обробки від режимних параметрів обробки заданих матеріалів заготовки та інструментальних матеріалів циліндричних фрез і свердл.

Практична цінність - оптимізація траєкторій обробки в САМ-програмі на прикладі корпусної деталі, скорочення (зменшення) часу на підготовку конструкторсько-технологічної документації, розрахунок оптимізованої керуючої програми для обладнання і скорочення часу механічної обробки на верстаті з ЧПК як наслідок.

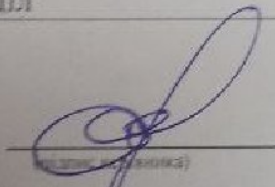
4 ВИМОГИ ДО РЕЗУЛЬТАТІВ ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Створити практичні рекомендації щодо застосування альтернативних технологічних методів виготовлення деталі типу Корпус за умов використання САМ-САМ систем.

5 ЕТАПИ ВИКОНАННЯ РОБІТ

Найменування етапів робіт	Строки виконання робіт (початок-кінець)
Аналітичний розділ	29.01.2025-25.02.2025
Технологічний розділ	26.02.2025-24.03.2025
Спеціальний розділ	25.03.2025-21.04.2025
Науково-дослідницький розділ	22.04.2025-05.05.2025

Завдання видано



В.А. Дербоба

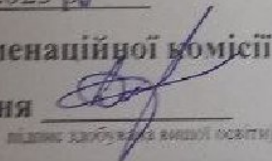
(ініціали та прізвище)

Дата видачі 15 січня 2025 р.

Дата подання до екзаменаційної комісії

6 травня 2025 р.

Прийнято до виконання



Д.М. Дорош

(ініціали та прізвище)

Реферат

Дипломна робота магістра: 4 глави, _____ с., _____ рис., _____ табл., _____ джерело.

Тема роботи: Ефективність механічної обробки корпусних деталей з використанням сучасного інструменту.

Актуальність теми дослідження полягає в заміні класичного інструменту, який використовується на сьогоднішній день на підприємстві при виготовленні деталі «Ланка», на прогресивний зарубіжний інструмент і оснащення більш високої якості. Впровадження нового інструменту надасть можливість виготовляти продукцію більш високої якості, при цьому зберігаючи більш тривалу працездатність інструменту, завдяки застосуванню прогресивного інструментального матеріалу ріжучого інструменту, який заснований на інтеграції нових сталей і сплавів.

Мета дослідження - аналіз роботи ріжучого традиційного інструменту та сучасного інструменту з нанесенням покриття на машинобудівних підприємствах, знайти та довести доцільність і ефективність його застосування.

Наукові положення: досягнення поставленої мети реалізується за допомогою вирішення таких завдань:

- На підставі типового технологічного процесу обробки деталі «Ланка» дослідити можливість заміни стандартного різального інструменту в умовах підприємства ПАТ «Дніпропетровський агрегатний завод».

- Уточнити ефективність використання сучасного інструменту.

- Встановити залежності порівняння інструменту без покриття і з покриттям під час виготовлення деталі.

- Розробити рекомендації, що забезпечують підвищення ефективності виробничого процесу при використанні сучасного більш точного інструменту.

Ідея роботи: обґрунтування ефективності сучасного інструменту в машинобудуванні, для підвищення якості деталі.

Об'єктом дослідження є процес виготовлення деталі «Ланка», за умови застосування сучасного різального інструменту.

Ключові слова: автоматизована обробка, багатошарові покриття, стійкість різального інструменту, нітридні покриття.

У цій роботі було поставлено та вирішено такі завдання:

1. На підставі типового технологічного процесу обробки деталі «Ланка» дослідити можливість заміни стандартного різального інструменту на новий більш точний в умовах підприємства ПАТ «Дніпропетровський агрегатний завод».

2. Уточнити поліпшення при використанні сучасного інструменту і порівняти його з базовим інструментом.

3. Установити залежності поліпшення при виготовленні деталі при застосуванні сучасного інструменту.

4. Розробити рекомендації, що забезпечують підвищення ефективності виробничого процесу при використанні сучасного більш точного інструменту.

Практична цінність - у роботі розв'язано питання з упровадженням прецизійного інструменту, з метою поліпшення його експлуатаційних характеристик, а також підвищення точності виготовлення деталей.

Робота пов'язана з науковим напрямом кафедри технологій машинобудування та матеріалознавства та виконана відповідно договору про співпрацю та договором про нерозголошення конфіденційної інформації та комерційної таємниці з ТОВ «ЕЙ БІ ЕМ ТЕХНОЛОДЖИ».

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
Розділ 1 Аналітичний розділ	9
1.1 Характеристика виробу та умови його експлуатації	9
1.2 Сучасні методи нанесення зносостійких покриттів для підвищення працездатності різального інструменту	11
1.3 Напрями вдосконалення різального інструменту зі зносостійкими покриттями	16
Розділ 2 Технологічний розділ.	27
2.1 Прогресивний різальний інструмент для обробки деталі «Ланка» на операціях	27
2.2 Застосування сучасного інструменту фірми SANDVIK Coromant..	29
2.3 Висновки щодо впровадження сучасного інструменту з покриттям нітрид-титану	32
2.4 Вибір методів обробки поверхонь (МОП) деталі.....	35
2.5 Побудова 3D моделі деталі з використанням Autodesk PowerSHAPE. Розрахунок автоматизованої механічної обробки деталі у САМ-системі PowerMILL.....	36
Розділ 3 СПЕЦІАЛЬНИЙ РОЗДІЛ.....	42
3.1 Проектування спеціального верстатного пристосування.....	42
3.1.1 Розрахунок точності верстатного пристосування.....	42
3.1.2 Розрахунок сил затиску.....	43
3.1.3 Розрахунок параметрів гідроциліндра.....	43
3.1.4 Технічна характеристика гідроциліндра.....	43
3.1.5 Розрахунок пристосування на міцність.....	44
Розділ 4 НАУКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ.....	45
4.1 Вплив елементів режиму різання на період стійкості різального інструменту зі зносостійкими покриттями на основі модифікованого нітриду титану	45
ВИСНОВКИ.....	53
ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ.....	55
ДОДАТКИ.....	57

ВСТУП

Успішний розвиток сучасної техніки, підвищення вимог до точності оброблення та якості поверхонь деталей машин і приладів, підвищення швидкостей і навантажень, застосовується завдяки використанню в техніці твердих сплавів, сплавів нітрид-титану, важкооброблювальних сталей і штучних матеріалів. Ефективність металорізального обладнання на сучасному етапі розвитку машинобудівного комплексу значною мірою залежить від працездатності різального інструменту.

Технологічні особливості ефективного застосування інструментів із СТМ зумовлені специфікою їхніх фізико-механічних властивостей і високою вартістю. Тому при впровадженні такого інструменту доцільно проводити техніко-економічне обґрунтування області застосування і вибору режимів різання методом оптимізації з накладенням технічних обмежень на показники процесу. Основою такого підходу є встановлення залежності основних показників процесу різання, наприклад, сил різання, температури різання, періоду стійкості інструменту і режимів обробки: глибини, подачі, швидкості, твердості оброблюваного матеріалу, геометрії інструменту.

Використання металорізального інструменту з попередньо нанесеними тонкими (1-5 мкм) зносостійкими покриттями забезпечує низку важливих переваг: підвищення продуктивності оброблення різанням на 20-100%, збільшення терміну служби інструменту до 1,5-10 разів під час оброблення конструкційних сталей, до 4 разів - під час різання корозійностійких і жароміцних сталей, у 1,5-2,5 раза - під час оброблення титанових і нікелевих сплавів. Крім того, досягається зниження витрат складнопрофільного інструменту внаслідок зменшення кількості його переточувань. Однак не завжди застосування покриттів для різального інструменту є економічно обґрунтованим і призводить до очікуваного ефекту. Для того щоб оцінити доцільність і ефективність їх використання, необхідне знання основних принципів застосування інструменту зі зносостійкими покриттями.

Якісні зміни у виготовленні різального інструменту пов'язані з інтенсивним розвитком наприкінці минулого століття іонно-плазмових технологій нанесення зносостійких покриттів. На світовому ринку технологій зі зміцнення поверхні інструменту завжди найширше були представлені два методи: метод хімічного осадження (Chemical Vapour Deposition - CVD) і метод фізичного осадження покриттів (Physical Vapour Deposition - PVD). У нашій країні більш широке промислове застосування отримали PVD-способи нанесення захисних покриттів. Річ у тім, що технології CVD мають на увазі використання дорогих високочистих хімічних реагентів ($TiCl_4$, NH_3 тощо) і прецизійних доза-торів хімічних прекурсорів, точний контроль продуктів хімічних реакцій у робочій камері тощо. А нанесення PVD-покриттів за допомогою дугового або тліючого розряду (магнетрона) має більшу продуктивність і не настільки чутливе до незначних відхилень технологічних параметрів.

Одним із найефективніших шляхів підвищення працездатності різаль-

ного інструмента є нанесення на його робочі поверхні зносостійких покриттів. Найбільшого застосування набули зносостійкі покриття, що наносяться методом конденсації речовини у вакуумі з іонним бомбардуванням (КІБ), який реалізується на установках типу «Булат». Відомо, що фізико-механічні та теплофізичні властивості зносостійких покриттів можуть значно відрізнятися від відповідних властивостей інструментальної основи. Змінюючи поверхневі властивості інструментального матеріалу, зносостійкі покриття справляють істотний вплив на характеристики процесу різання та збільшують опірність контактних майданчиків ріжучого інструмента макро- і мікро-руйнуванням.

Найбільше застосування в промисловості знайшли одношарові одноелементні зносостійкі покриття, які дають змогу істотно підвищити працездатність ріжучого інструменту. Однак у низці випадків ефективність такого інструменту недостатня. Подальше вдосконалення різального інструменту з покриттями може йти шляхом створення нових складів покриттів, зокрема й багатшарових, які більшою мірою можуть реалізувати вимоги, які висуваються до зносостійких покриттів. Однак відсутність науково-обґрунтованих принципів їх формування призводить до того, що часто одні й ті самі багатшарові покриття рекомендують використовувати для різних умов різання і навпаки, в одних і тих самих умовах обробки рекомендують різні багатшарові покриття, які складаються з послідовно нанесених шарів карбиду титану або карбо-нітриду титану і тонко поверхневого шару оксиду алюмінію А1203. Альтернативним варіантом слугували багатшарові покриття типу TiC-TiCN-TiN. Причому поняття «багатшарові» в багатьох випадках вельми умовне, оскільки методи напилення дають змогу домогтися відсутності чітко виражених міжфазних кордонів між шарами, а також між покриттям і підкладкою. Багатшарові зносостійкі тверді покриття мають підвищену тріщиностійкість, поліпшену адгезію, високу ударну міцність, менший рівень внутрішньої напруги і напружень на межі «покриття - підкладка» внаслідок вирівнювання коефіцієнтів термічного розширення. Наприклад, покриття TiCN має багатшарову двофазну структуру TiN-TiCN, що збільшує міцнісні та в'язкісні характеристики порівняно з покриттям TiN.

В останнє десятиліття розроблено і широко застосовують різні комбінації покриттів із застосуванням тонких зовнішніх твердомастильних покриттів (наприклад, TiAlN/MoS₂), які забезпечують ефективне виношування стружки та ідеальне припрацювання інструменту. Активно ведуться розробки аморфних вуглецевих покриттів у різних модифікаціях. Низьким коефіцієнтом тертя і високою зносостійкістю володіють високотверді алмазоподібні покриття (diamond-like carbon coatings - DLC). Однак у них є серйозний недолік: дуже високий рівень внутрішніх напружень, що призводить до крихкості та відшарування за високих контактних навантажень і обмежує їхню ефективну товщину до ~ 1 мкм. Ще одна проблемна властивість таких покриттів - низька теплопровідність, яка може призводити до їх локальної графітизації з по-

дальшим вимиванням. Верхня робоча температурна межа обмежена ~ 250 °C, і потрібне застосування змащувальних охолоджувальних рідин (ЗОР). Покрыття кубічного нітриду бору (CBN) також володіють високим рівнем внутрішніх напружень, що обмежують їхню товщину до $\sim 0,1$ мкм.

1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Характеристика виробу та умови його експлуатації

І
р
с
н
н
т

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

І
-
-
я
Е

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

1.2 Сучасні методи нанесення зносостійких покриттів для підвищення працездатності різального інструменту

У процесі роботи ріжучий інструмент перебуває в умовах впливу на нього низки несприятливих чинників, наявність яких зумовлена високими контактними температурами, напруженим станом ріжучого клина інструменту, активним перебігом фізико-хімічних процесів, вібраціями, що в сукупності призводить до його інтенсивного зношування в умовах абразивної дії оброблюваного матеріалу, адгезійно-втомлюваного, корозійно-окислювальних і дифузійних процесів.

Дослідженню питань підвищення працездатності ріжучого інструменту присвячено велику кількість робіт вітчизняних і зарубіжних дослідників: А. І. Бетанелі, В. Ф. Боброва, О. С. Верещаки, Г. І. Грановського, С. М. Григор'єва, Л. М. Данієляна, Н. Н. Зоріва, Ю. Г. Кабал-дину, М. В. Касьяна, В. А. Кудинова, В. Д. Кузнецова, Т. Г. Кабал-дину, В. А. Кудинова, В. Д. Кузнецова, М. Данієляна, М. М. Зорєва, Ю. Г. Кабал-діна, М. В. Касьяна, В. А. Кудинова, В. Д. Кузнецова, Т. І. Лоладзе, М. Ф. Полетікі, О. М. Резнікова, В. М. Подураєва, С. С. Силіна, В. О. Сінопаль-нікова, В. П. Табакова, М. В. Талантова, Е. М. Трентта та ін. Результати дослідницьких робіт цих авторів дали змогу детальніше вивчити механізми зношування різального інструмента, зокрема і з покриттями, зіграли важливу роль у розв'язанні низки задач теорії різання металів.

Виділяють кілька шляхів підвищення працездатності різального інструменту:

- використання нових інструментальних матеріалів: порошкових швидкорізальних сталей, твердих сплавів, синтетичних надтвердих матеріалів і ріжучої кераміки;
- удосконалення конструкції різального інструменту;
- оптимізація режимів різання і застосування ЗОР;

- зміцнення робочих поверхонь ріжучого інструменту;
- застосування зносостійких покриттів, що наносяться на робочі поверхні ріжучого інструменту.

Одним із найбільш раціональних способів підвищення працездатності різального інструменту є нанесення на нього зносостійких покриттів. Цілеспрямована зміна й оптимізація властивостей покриттів дає змогу найефективніше використовувати різальний інструмент у процесі його експлуатації.

Через велику кількість методів підвищення працездатності різального інструменту необхідне їхнє порівняння для визначення раціональних галузей застосування, виявлення їхніх переваг і недоліків та напрямів удосконалення.

Методи плазмового, детонаційного, хімічного та фізичного осадження покриттів.

Плазмове напилення - метод, за якого нагрівання, плавлення, диспергування і перенесення матеріалу, що напилюється на підкладку, здійснюють високотемпературним струменем плазмоутворювального газу. Плазмовим напиленням отримують покриття з оксидів, карбідів, боридів, нітридів тугоплавких матеріалів -Ti, Zr, Mo, Nb, Ta, Cr, W, Si, Al.

Покриття вирізняються високою зносостійкістю і теплостійкістю. Однак наявність таких серйозних недоліків, як висока пористість, низька адгезійна міцність покриття з інструментальним матеріалом, нестаціонарність температур у процесі нанесення покриття і наявність високих залишкових напруг, істотно обмежує сферу застосування плазмових покриттів для зміцнення різального інструменту.

Для підвищення працездатності різального інструменту застосовується метод фінішного плазмового зміцнення (ФПУ). Суть методу полягає в нанесенні на робочі поверхні різального інструменту тонкоплівкового (1-3мкм) покриття, що містить вуглець, кремній і кисень. Структура покриття має аморфну будову. Отримане покриття не має пор, його твердість досягає (14 - 16) ГПа. Період стійкості зміцненого різального інструменту збільшується в 1,5 - 4 рази.

Метод детонаційного нанесення покриття полягає в нагріванні, прискоренні та перенесенні частинок розпилюваного матеріалу струменем продуктів детонаційного згоряння сумішей горючих газів із киснем. Висока кінетична енергія частинок розпилюваного матеріалу визначає високу міцність зчеплення матеріалу покриття з підкладкою і його низьку пористість.

Плазмові та детонаційні покриття обмежено використовують для зміцнення різального інструменту. Основні недоліки процесів нанесення покриття - слабка керована здатність властивостями покриттів, низька продуктивність, сильний шум під час роботи устаткування і його висока вартість.

Методи хімічного осадження покриттів з парогазової фази (методи ХОП), які отримали у світовій практиці найменування Chemical Vapour Deposition (CVD), засновані на процесі, в якому стійкі тверді продукти реакції конденсуються на підкладці в середовищі, в якому відбуваються в ньому

хімічні реакції (дисоціація, відновлення та ін.). Схему наведено на рис. 1.2. Методами ХОП наносять покриття типу карбідів, нітридів, боридів, оксидів металів IV - VI груп Періодичної системи елементів. Оскільки хімічні реакції протікають переважно за високих температур ((800 - 1200) °C), то зміцненню піддається в основному твердосплавний інструмент. Покриття, отримані методами ХОП, на відміну від плазмових, мають вищу щільність, рівномірність за товщиною і високу міцність зчеплення з основою. Відмінною особливістю покриттів, отриманих методами ХОП, є формування перехідної зони між покриттям і твердим сплавом. На якість і фізико-механічні властивості покриттів впливають склад суміші, швидкість її подачі, тиск, температура, вихідна чистота компонентів суміші. Хімічні та фізичні процеси, що протікають під час реалізації методів ХОП, а також схеми реакторів, докладно описані в.

М
С
У
ТІ

**Конфіденційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 30.06.2025р.**

2

**Конфіденційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 30.06.2025р.**

До цієї групи належать також методи фізичного осадження покриттів

(ФОП) або Physical vapour deposition (PVD). Термін ФОП описує три основні способи нанесення покриттів: випаровування, розпилення та іонне осадження.

У загальному випадку і джерело парової фази (мішень), і підкладка, на яку осідає матеріал, розташовуються у вакуумній камері. Можливі варіації робочої атмосфери камери (наприклад, присутність нейтральних або хімічно активних газів), складу матеріалу, що випаровується, методів нагріву випарувача, потенціалу зсуву на підкладці призводять до великої різноманітності методів нанесення покриттів.

Процес розпилення проходить у робочій камері, заповненій газом за тиску (2,5 - 130) Па. Між мішенню і підкладкою, віддалених одна від одної на відстані близько 5 см, прикладається напруга від 1 до 5 кВ і протікає струм щільністю близько 1 мА/см². Швидкість осадження покриття досягає 50 нм/хв.

Процес осадження покриття протікає в кілька стадій:

1. Підготовка осаджуваного матеріалу - утворення парової фази.
2. Перенесення парів між джерелом і підкладкою.
3. Протікання реакції між паровою фазою й атмосферою камери.
4. Конденсація парів і зростання плівки.

Кожна з цих стадій у процесі нанесення покриттів методами ФОП може контролюватися незалежно від інших, у чому полягає безсумнівна перевага перед методами ХОП. Серед методів ФОП, створених на базі планарного діодного розпилення, найбільшого поширення набули: конденсація речовини з плазмової фази у вакуумі з іонним бомбардуванням (метод КІБ) (рис. 1.3), магнетронно-іонне розпилення (метод МІР), реактивний електронно-променевий плазмовий метод (метод РЕП), іонне плакування, а порівняно з іншими методами нанесення покриттів (плазмове напилення, ХОП тощо) методи ФПН володіють цілою низкою переваг.

1. Виняткова різноманітність складів осаджуваного матеріалу. Є можливість наносити практично будь-який метал, тугоплавке або інтерметалічне з'єднання, одно- і багатошарові, композиційні покриття.

2. Зміна температури підкладки в широких межах, що дає змогу використовувати ці методи як універсальні для нанесення покриттів на ріжучий інструмент зі швидкорізальної сталі та твердого сплаву.

3. Висока якість поверхні покриття, порівнянна з якістю вихідної поверхні підкладки.

Метод РЕП полягає в утворенні плазмового потоку металу за допомогою вакуумної дуги (кільцевий термокатод і анод, що представляє розплавлений електронним пучком метал, який наносять), прискоренні його в напрямку підкладки й подальшій конденсації на ній іонів нейтральних атомів за одночасної плазмохімічної реакції з реактивним газом.

Як випарник під час магнетронно-іонного розпилення використовується-

ся пластина-мішень, яка підключається до негативного потенціалу, як анод. Під впливом магнітного поля, створюваного постійним магнітом, розташованим за катодом-мішенню, електрони здійснюють рух циклоїдальними траєкторіями у вузькій зоні над мішенню. При цьому ступінь розпилення і щільність іонного потоку збільшуються на порядок порівняно з простим діодним розпиленням. На відміну від іонного плакування і методу КІБ, коли застосовується точкове джерело плазми, за методу МІР джерело плазми лінійне. Змінюючи розташування джерел плазми, можна знизити «тіньовий ефект». Великим недоліком методу МІР є стрибкоподібне плакування поверхні мішені шаром нітриду (карбіду, оксиду тощо), що призводить до зниження роботи виходу вторинних електронів і ступеня розпилення.

При іонному плакуванні оброблювану поверхню під час осадження покриття додатково піддають іонному бомбардуванню для утворення перехідного шару і підвищення адгезійної міцності покриття, що наноситься, з основою. Іонне бомбардування забезпечує очищення поверхні виробу перед нанесенням покриття та її травлення в процесі осадження, що створює сприятливі умови для формування покриття. Основними недоліками методу є мала іонізація конденсованого потоку, низька продуктивність, великі енерговитрати процесу.

**Конфіденційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 30.06.2025р.**

(анод); 2 - зміцнюваний інструмент; 3 - катод-випарник; 4 - електромагніти; 5 - напуск реакційного газу; 6 - вакуумний насос; 7, 8 - джерела живлення.

Найбільшого поширення у світовій практиці нанесення зносостійких покриттів набув метод КІБ. Він заснований на генерації речовини ка-тодною плямою вакуумної дуги сильнострумовевого низьковольтного розряду, що розвивається в парах матеріалу електрода. Подача у вакуумний простір реагую-

чих газів (азоту, метану, ацетилену) в умовах іонного бомбардування призводить до конденсації покриття на поверхні ріжучого інструменту завдяки протіканню плазмохімічних реакцій. Принципова схема вакуумноплазмової установки для реалізації методу КІБ представлена на рис. 1.3. Використання методу КІБ дає змогу значно розширити технологічні можливості застосування різального інструменту з покриттями: ефективніше керувати технологічними процесами при нанесенні покриттів із заданими властивостями, одержувати покриття з високою адгезійною міцністю за температур (200-600) °С, запобігати утворенню дефектів на поверхні різального інструменту. До важливих переваг методу належать висока продуктивність і наявність серійно випускаються установок, що дозволяють широко використовувати його в промислових цілях.

Для ріжучого інструменту зі зносостійкими покриттями, що наносяться методами ФОГТ, період стійкості підвищується в 6-10 разів..

1.3 Напрями вдосконалення різального інструменту зі зносостійкими покриттями

У сучасному виробництві до зносостійких покриттів різального інструменту висуваються підвищені вимоги, зумовлені комплексом чинників. Ці чинники пов'язані з удосконаленням властивостей покриттів, композиції «покриття - інструментальний матеріал» та оптимізацією умов роботи різального інструменту. Оптимізація умов використання інструменту пов'язана зі зниженням процесу наростання і інтенсивності адгезійно-втом'яних процесів, підвищенням жорсткості конструкції інструменту і верстатного обладнання.

Велике різноманіття типів покриттів, що наносяться на різальний інструмент, можна класифікувати за певним набором властивостей і функцій, що визначають їхнє службове призначення: за складом покриття та його будовою (рис. 1.4).

Розглядають такі напрями вдосконалення різального інструменту зі зносостійкими покриттями:

- розроблення та вдосконалення конструкцій багат шарових покриттів
- удосконалення технології нанесення покриттів розробка нових складів покриттів.

Одним із напрямів удосконалення покриттів є створення багат шарово-композиційних покриттів. Багат шарові покриття характеризуються плавним переходом фізико-механічних і теплофізичних властивостей покриттів від інструментальної основи до верхнього граничного шару покриття. Підбираючи властивості і товщину кожного шару залежно від його функціонального призначення, можна більш ефективно варіювати властивості всього покриття в цілому. Крім того, створення багат шарового покриття забезпечує підвищення опору його крихкому руйнуванню під час впливу змінних термомеханічних навантажень.

У роботах розглядаються принципи побудови багат шарових покрит-

тів. Зазначається, що покриття повинно складатися з таких шарів: верхнього - твердого, зносостійкого шару, що має фізико-хімічну пасивність щодо оброблюваного матеріалу та високу термодинамічну стійкість; нижнього - який має максимальну кристалохімічну сумісність із матеріалом основи та забезпечує максимальну адгезію з поверхнею інструменту; проміжних шарів, які мають змінні властивості та забезпечують адгезійний зв'язок між верхнім і нижнім шарами, а також володіють бар'єрними функціями (априклад, під час теплопереносу, дифузії, для забезпечення термодинамічної стійкості).

**Конфіденційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 30.06.2025р.**

**Конфіденційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 30.06.2025р.**

Рисунок 1.4 – Фактори, що визначають фізико-механічні властивості покриттів, отриманих методами фізичного осадження, та їхній вплив один на одного

**Конфіденційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 30.06.2025р.**

**Конфіденційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 30.06.2025р.**

У роботі рекомендується при формуванні багатошарових покриттів як верхні шари використовувати матеріали з вищою енергоємністю і, отже, зносостійкістю, ніж нижні шари. Як перехідні шари від інструментальної основи до зносостійкого покриття (верхнього шару) рекомендується використовувати метали (Mo, Cr), які мають підвищені адгезійні властивості, що дають змогу знизити напружений стан у покритті, збільшити тріщиностійкість. Такі покриття володіють підвищеними демпфувальними властивостями і високою стабільністю.

У роботах пропонується конструкція багатошарового покриття з шарів TiN і TiCN, що чергуються. Варіюючи товщиною м'яких шарів можна змінювати градієнт релаксаційних властивостей покриття, а попереднє нанесення на основу шару чистого титану дає змогу одержати високу зчіпленість покриття з основою.

У роботі досліджено вплив багатошарових покриттів із шарів TiN-MoN-TiN і TiN-MoHfN-TiN, що чергуються, нанесених на пластини з твердого сплаву BK6 і BK8. Товщина шарів становила ~ 0,3 мкм при загальній товщині покриття (6 - 7) мкм. Під час обробки сталі 30ХГСА період стійкості інструменту з такими покриттями підвищився в 2,4-2,9 раза.

Для підвищення міцності зчеплення покриття з інструментальною основою зі швидкорізальної сталі в роботі запропоновано створення між ними

перехідного адгезійного шару, що містить елементи матеріалів основи та покриття. Хімічна спорідненість такого шару з матеріалом як покриття, так і інструментальною основою зменшує градієнт напруг між ними та підвищує міцність зчеплення покриття та інструменту, що сприяє підвищенню працездатності різального інструменту в 3,6-6,0 разів на операціях зенкування, свердління та зенкерування.

Застосування комбінованого покриття, що складається з нижнього шару TiC, що осідає методом ГТ, що дає змогу забезпечити високу міцність зчеплення покриття з основою, м'якого проміжного шару з Ti, Zr або Nb і верхнього з ZrN, що осідає методом КІБ, сприяє підвищенню періоду стійкості інструменту під час фрезерування вуглецевої сталі до 2,0 - 2,5 разів. Вибір проміжного шару здійснюється залежно від його щільності та модуля пружності.

Розроблені конструкції багатошарових покриттів TiN-TiCN-TiN і TiZrCN-TiZrN, обложені методом КІБ, збільшують період стійкості торцевих фрез із твердосплавними пластинами МК8 у 1,5 - 3,0 раза порівняно з ріжучим інструментом із покриттям TiN під час оброблення заготовок зі сталей 5ХНМ, 18Х18Н10Т і титанового сплаву ВТ22.

У роботі для підвищення працездатності багатошарових покриттів, що використовуються на операціях торцевого фрезерування, рекомендується конструкція, що містить проміжний шар із підвищеною тріщиностійкістю. Як матеріал проміжного шару обрано нітрид титану і цирконію. Як матеріал проміжного шару обрано нітрид титану і цирконію. Розроблені покриття TiCN-TiCN-TiZrN-TiN і TiN-TiZrN-TiN збільшують період стійкості фрез у 1,6 - 4,7 раза під час оброблення сталей 45 і 5ХХМ порівняно з різальним інструментом із покриттям TiN.

Застосування багатошарових композиційних покриттів дає змогу використовувати як матеріали покриттів вельми тендітні та кристалохімічно несумісні з інструментальним матеріалом системи, що мають найбільшу термодинамічну стійкість. Такі системи (Al₂O₃, HfB₂, NbB₂, Si₃N₄) здатні зберігати високу твердість та інертність за підвищених температур.

Іншим напрямком підвищення періоду стійкості різального інструменту зі зносостійкими покриттями є вдосконалення технології нанесення покриття. Структурно-фазовий склад покриття та його властивості, а також ефективність роботи інструмента з покриттям залежать від співвідношення параметрів вакуумно-дугового процесу нанесення зносостійкого покриття.

На працездатність різального інструмента з покриттям впливає фізико-хімічний стан поверхні інструментальної основи в процесі нанесення покриття, що формується на стадії іонного очищення. У роботах досліджено вплив параметрів очищення на підвищення працездатності різального інструменту з покриттям. Відзначається збільшення середньої міцності на (10 - 15) % і зниження варіаційних розкидів міцності на (40 - 80) % . Для іонного очищення рекомендуються катоди з титану і хрому. Водночас у роботі відзначається негативний вплив іонного бомбардування, зумовлений утворенням на поверхні підкладки з твердого сплаву крихких інтерметал-лічних сполук типу

MeCoх, де Me -Ti, Cr, Mo, що призводить до зниження зносостійкості різального інструменту. Для усунення такого ефекту рекомендується використовувати катоди з нікелю і заліза, що знаходяться в одній групі таблиці періодичної системи елементів з кобальтом.

У роботах розглядається вплив основних технологічних параметрів процесу нанесення покриттів TiN, ZrN методом КІБ на швидкість зношування інструменту зі швидкорізальних сталей Р18, Р6М5К5, Р12Ф4К5, Р12Ф4К5 і твердих сплавів ВК6, Т5К10. Відзначається помітний вплив параметрів процесу КІБ на відносне зношування інструменту. Найбільший вплив чинять тиск реакційного газу (азоту) і напруга на інструменті в процесі нанесення покриття, в той час як сила струму дуги і час осадження покриття впливають неоднозначно. Зазначається, що для кожного типу покриттів необхідно проводити оптимізацію технологічних параметрів процесу.

У роботах розглянуто вплив положення інструмента в камері установки в процесі нанесення покриття на його структуру і працездатність. Формування шаруватих структур при обертанні зміцнюваного інструменту в камері призводить до підвищення його періоду стійкості внаслідок кращої опірності покриттів крихкому руйнуванню.

Вплив параметрів процесу нанесення покриттів TiN і ZrN методом КІБ на їхню твердість розглядається в роботах. Зазначається максимальна твердість покриття за стехіометрії складу, що досягається оптимізацією технологічних параметрів - тиску реакційного газу, напруги зсуву, індукції магнітного поля та струму розряду.

Вплив температури конденсації в процесі нанесення покриттів розглядається в роботах. У роботі запропоновано спосіб підвищення працездатності різального інструмента застосуванням комбінованого температурного режиму. Температура процесу нанесення покриття впливає на його дефектність і, отже, на його міцність і твердість, а також на міцність адгезійного зв'язку з інструментальною основою і рівень залишкових напружень. Осадження нижнього шару покриття при високій температурі процесу призводить до збільшення адгезії з інструментальною основою, а формування верхнього шару при більш низькій температурі сприяє підвищенню твердості та зносостійкості покриття.

У роботах розглядається вплив сепарації плазмового потоку на структуру, фізико-механічні характеристики та зносостійкість покриття TiN. Зниження вмісту крапельної фази, поліпшення структурних характеристик призводить до підвищення зносостійкості таких покриттів у 1,5-2 рази.

Необхідною умовою ефективного використання одношарових і багатшарових покриттів є розробка нових зносостійких матеріалів і оптимізація їхніх складів залежно від властивостей оброблюваного матеріалу та умов різання.

Одним зі шляхів підвищення працездатності різального інструменту є зміна складу газової суміші в процесі конденсації покриття.

У роботах розглядається вплив ацетилену під час конденсації карбонітридних покриттів TiCN, TiZrCN, TiCrCN, TiMoCN. Визначення опти-

мального складу ацетилену в газовому середовищі дало змогу підвищити період стійкості різального інструмента з карбонітридними покриттями порівняно з аналогічними нітридними покриттями за рахунок зміни механічних властивостей. Так, період стійкості різального інструменту з покриттям TiCN підвищився в 2,2 раза порівняно з покриттям TiN під час фрезерування сталі 30ХГСА. Максимальне збільшення періоду стійкості різального інструмента з покриттям відповідає вмісту ацетилену в газовій суміші (25 - 40)%.

Застосування покриттів TiCN, нанесених методом КІБ, на інструмент, виготовлений зі швидкорізальної сталі, дає змогу збільшити період стійкості завдяки зниженню тертя і створенню теплового бар'єру порівняно з покриттям TiN.

Значно більші можливості представляє модифікування матеріалу покриттів шляхом легування за рахунок зміни складу катодів при нанесенні покриттів, як з роздільних, так і складових або сплавних (інтерметалідних) катодів.

Зазначається, що введення в покриття NbN як легуючого елемента Zr збільшує термодинамічну стійкість покриття і його адгезійну міцність. У результаті період стійкості інструменту з твердих сплавів і швидкорізальних сталей з цим покриттям підвищується в 2 - 5 разів.

У роботі порівнювали період стійкості різального інструменту зі складними покриттями TiZrN, TiNbN і ZrNbN з одноелементними покриттями TiN, NbN і ZrN. Застосування покриттів складного складу дає змогу збільшити період стійкості твердосплавного і швидкорізального інструменту додатково в 1,5-1,8 раза порівняно з одноелементними покриттями.

У світовій практиці найбільшого поширення набули покриття на основі модифікованого нітриду титану. При цьому як легувальні елементи використовуються цирконій, алюміній, молібден, хром, залізо і кремній. Вплив легуючих елементів проявляється в поліпшенні фізико-механічних властивостей як самих покриттів, так і в зміні взаємодії покриття з інструментальним і оброблюваним матеріалами.

У роботах розглядається вплив складів покриттів на основі нітридів систем Ti-Zr, Ti-Al, Ti-Fe, отриманих методом КІБ, на структурно-туристичні та механічні властивості та зношування ріжучого інструменту з покриттями. Покриття отримано з використанням складових та інтерметалідних катодів. Зазначається, що отримані покриття мають вищу мікротвердість, що зумовлено зміцненням, спричиненим взаємодією легувального елемента з елементами покриття. Застосування в якості легуючих елементів цирконію та алюмінію призводить до підвищення залишкових стискаючих напружень порівняно з покриттям TiN

(табл. 1.6). При цьому для покриття TiZrN спостерігається підвищення коефіцієнта відшарування, що свідчить про зниження міцності адгезійного зв'язку покриття з інструментальною основою; для покриття TiAlN - міцність адгезійного зв'язку збільшується. Легування залізом веде до зниження залишкових стискаючих напружень і підвищення міцності зчеплення покриття

та інструментальної основи. Авторами робіт відзначається, що поліпшення фізико-механічних властивостей покриттів складного складу на основі нітридів сприяє стримуванню процесів утворення і розвитку тріщин. Застосування розроблених покриттів складного складу призводить до підвищення періоду стійкості різального інструменту під час фрезерного оброблення заготовок зі сталей 30ХГСА і 12Х18Н10Т у 1,3 - 2,3 раза порівняно з покриттям TiN.

**Конфіденційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 30.06.2025р.**

Застосування покриття TiCrN підвищує період стійкості інструменту зі швидкорізальної сталі 35 в 1,2 - 1,7 раза порівняно з покриттям TiN.

Вивчення впливу складу покриття TiMoN, отриманого з роздільних катодів, на фізико-механічні властивості та працездатність різального інструменту з покриттям проводилося в роботі. Досліджувані покриття мають мікротвердість у 1,5 - 1,6 раза вищу, ніж у покриття TiN. При цьому для покриття на основі нітриду титану і молібдену спостерігається зниження міцності зв'язку з інструментальним матеріалом. Застосування покриття TiMoN дало змогу підвищити період стійкості твердих сплавних пластин під час фрезерування заготовок зі сталей 30ХГСА і 12Х18Н10Т у 1,2 - 2,2 раза порівняно з одноелементним покриттям TiN.

Використання як легувального елемента кремнію має низку переваг. Нітриди кремнію вирізняються високою твердістю за підвищених температур, хімічною інертністю, теплостійкістю. Нанесення покриття дає змогу збільшити період стійкості різального інструменту в 2-4 рази під час фрезерування заготовок зі сталей 30ХГСА і 12Х18Н10Т і чавуну СЧ32.

Проведені дослідження фізико-механічних властивостей покриттів TiN, легованих молібденом, хромом і кремнієм, показали (табл. 1.7), що їхнє ви-

користання призводить до збільшення мікротвердості отриманих покриттів на (18-25)% і залишкових стискальних напруг у 1,3-1,9 раза порівняно з покриттям TiN. Водночас знижується міцність зчеплення з інструментальною основою, про що свідчить підвищення коефіцієнта відшарування на (35-80)%.

З даних робіт випливає, що руйнування зносостійкого покриття в процесі експлуатації різального інструменту відбувається в результаті його крихкого руйнування з утворенням тріщин на ділянці контакту стружки з передньою поверхнею.

Передумовою утворення тріщин у покритті є пружно-пластична деформація ріжучого клина інструменту внаслідок дії контактних навантажень і протікання явищ повзучості в матеріалі інструментальної основи. Відомо, що повзучість різко інтенсифікується при збільшенні температур і напружень, що діють у ріжучому клині.

Іншою можливістю зниження процесів тріщиноутворення в покритті є підвищення опірності крихкому руйнуванню (підвищення тріщиностійкості) покриттів. У роботі показано, що легування покриття на основі нітриду титану залізом, алюмінієм, молібденем і цирконієм призводить до підвищення критичного коефіцієнта інтенсивності напруг K_{Ic} сна (15 - 50) % (рис. 7). При цьому найбільше підвищення величини K_{Ic} викликає використання як легувального елемента цирконію, молібдену та алюмінію. Підвищення критичного коефіцієнта інтенсивності напружень K_{Ic} зносостійких покриттів складного складу і зниження теплового та напруженого стану в ріжучому клині інструменту з такими покриттями збільшують час роботи до утворення тріщин у 1,4 - 2,3 раза порівняно з покриттям TiN.

**Конфіденційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 30.06.2025р.**

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

личина оцінює здатність матеріалу чинити опір руйнуванню тільки при абсолютно крихкому руйнуванні. Водночас таке руйнування можливе тільки за абсолютного нуля температури. Для інших випадків спостерігається так зване квазікрихке руйнування, що характеризується проявом пластичних властивостей матеріалу, найчастіше спостерігається у вершині тріщини. При цьому оцінкою опору руйнуванню слугує величина в'язкості руйнування $K_{ісп}$. Так за даними роботи для найбільш крихкого матеріалу - алмазу – величина $K_{ісп} = (6 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{\frac{1}{2}})$ у 2,6 рази більше, ніж $K_{ісп} = (2,3 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{\frac{1}{2}})$.

З аналізу літературних даних видно, що модифікування матеріалу покриття шляхом легування покращує його фізико-механічні властивості. У зв'язку з цим викликає інтерес дослідження модифікування покриттів шляхом введення до їхнього складу двох легуючих елементів і вплив складу отриманих зносостійких покриттів на їхні властивості.

Для наближеної оцінки властивостей складнолегованих сплавів у матеріалознавстві застосовують співвідношення типу:

$$Y = K_0 Y_0 + K_1 X_1 + K_2 X_2 + \dots + K_i X_i \quad (1.1)$$

де Y - властивість сплаву; Y_0 - властивість основи сплаву; K_0 - коефіцієнт зміцнення основи сплаву; K_1, K_2, K_i - коефіцієнт зміцнення від введення 1% легувальних елементів; X_1, X_2, X_i - вміст легувального елемента в сплаві.

Слід зазначити, що зміцнення складнолегованих сплавів не складається адитивно зі зміцнення, зумовленого введенням окремих елементів; з'являється ще додаткове зміцнення, зумовлене взаємодією легувальних елементів між собою у твердому розчині. Тому лінійна модель зміцнення є сильно спрощеною. Не можна на підставі приватних залежностей зміцнення окремими легуючими елементами отримати загальну залежність зміцнення сплаву від дії декількох легуючих елементів.

У роботах пропонуються нові багатоелементні покриття. Так, фірма Pramet Sumperk розробила ріжучі пластини з покриттям TiAlSiN , що наноситься методом ФОП, для операцій фрезерування і свердління. Такі пластини забезпечують підвищення періоду стійкості в 2,6-3,5 рази порівняно з покриттями TiN .

Застосування алюмінію і кремнію як легуючих елементів розглядалося в роботі. Застосування покриттів TiAlSiN , нанесених на твердосплавні черв'ячні дрібномодульні фрези, збільшує їхній період стійкості під час обробки заготовок зі сталей 40X і 20X13 у 1,8-2,2 рази порівняно з покриттям TiN .

У роботі наголошується, що великий інтерес становлять потрібні нітриди тугоплавких металів, які утворюють у результаті повної розчинності трифазні системи, що складаються з тісно переплетених між собою областей - доменів із найрізноманітнішою послідовністю пакування атомних шарів, а не з чітко обмежених кристалів із кубічною або гексагональною структурою. Такі системи мають дуже високу термодинамічну стійкість у поєднанні з достатньою міцністю і в'язкістю. Дослідження працездатності твердосплавного

ріжучого інструменту з покриттями ZrHfCrN і TiNbCrN показало підвищення періоду стійкості пластин ВК6 у 2,2-3,6 раза порівняно з покриттями CrN і TiN і в 1,4-2,0 раза порівняно з покриттям TiCrN під час оброблення сталі 45, жароміцного сплаву ВТ20, який піддається деформації.

Проведені в роботі дослідження показують, що додаткове введення в покриття на основі нітриду титану і цирконію як легувального елемента заліза призводить до зниження залишкових стискаючих напружень і підвищення міцності зчеплення з інструментальною основою. При цьому мікротвердість покриття зростає в 1,3 раза порівняно з покриттям TiZrN. Встановлено, що застосування покриття TiZrFeN знижує інтенсивність зношування пластин зі швидкорізальної сталі Р6М5К5 у 1,3 раза під час обробки заготовок зі сталі 30ХГСА і в 1,26 раза - зі сталі 12Х18Н10Т порівняно з пластинами з покриттям TiZrN.

На підставі аналізу розглянутих вище робіт можна зробити висновок про перспективність напрямку створення покриттів на основі ніт-ридів, модифікованих додатковим введенням декількох легуючих елементів. Отримувані при цьому покриття складного складу мають кращі, порівняно з простішими фізико-механічні властивості, наслідком чого є підвищення працездатності різального інструменту з такими покриттями.

2. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

2.1 Прогресивний різальний інструмент для обробки деталі «Ланка» на операціях

Під час обробки деталі «Ланка» на фрезерній, свердлильній, токарній з ЧПК, програмно-комбінованій операціях використовується такий основний різальний інструмент:

1. Фрезерна операція з ЧПК (010)
Фреза Ø63 R220.29-0063-10.4A, оправка – BT50SEMC22-100, пластина – RPHT2006MOT-ME12, сплав F40M
2. Свердлильна операція з ЧПК (015)
Свердло Ø3,3 VAPDMSUSD0330
3. Фрезерна з ЧПК операція (020)
Фреза Ø40 AQXR404SA32S, пластина - QOGT2062R-G1, сплав VP15TF
4. Фрезерна з ЧПК операція (030)
Фреза Ø18 ELC4JCD1800, сплав TF 15
5. Фрезерна з ЧПК операція (040)
Фреза Ø20 AQXR204SA20L, пластина - QOMT1035R-M2, сплав VP30RT
6. Фрезерна з ЧПК операція (040)
Фреза Ø20 R3 EC-B6200-76C20-104, сплав IC 903
7. Фрезерна з ЧПК операція (050)
Фреза Ø12 R2 - SZE4120SG

Розглянемо детальніше операції фрезерування і свердління. На першій операції відбувається фрезерування поверхонь усього «Звеноа», 2214-0007-600-IT5K10 фрезою Ø200 мм Фреза торцева на-садна зі вставними ножами, оснащеними пластинами з твердого сплаву. Фрезерування здійснюють на верстаті 6P12 (рис. 2.1).

На операціях свердління використовують свердла 2300-2643, Ø12,2
2300-2594, Ø7,1 2300-6576, свердло Ø5,1
2300-0139, свердло Ø3,0 мм P9K5

Під час обробки деталі інструментом без покриття відбувається швидке зношування інструменту і погіршується якість оброблюваної поверхні. Щоб підвищити довгоживучість роботи інструменту, і тим самим поліпшити якість обробки поверхні, є сенс впровадити новий прецизійний інструмент на основі покриттів нітриду титану. Як зазначалося в розділі 2, під час використання інструменту з покриттям нітриду титану працездатність інструменту збільшується в 3,2-5,5 разів. Хоча цінова політика на інструмент з покриттям трохи вища, ніж без, але за рахунок довгостроковості та якості обробки вони перевершують у роботі в сучасному машинобудуванні.

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

2.2 Застосування сучасного інструменту фірми SANDVIK Coromant

Компанія Sandvik Coromant - один із кількох світових лідерів у виробництві та постачанні високопродуктивного металорізального інструменту. По всьому світу в компанії Sandvik Coromant працюють понад 8000 осіб, з них 1800 на найбільшому заводі з виробництва твердосплавних пластин і корпусів інструменту в м. Гімо (Швеція). Компанія постачає широкий асортимент інструменту для точіння, фрезерування, свердління, обробки різьблення, а також сучасні системи модульного швидкозмінного оснащення. Асортимент продукції, що випускається компанією Sandvik, перевищує 25000 найменувань.

Sandvik Coromant - це не тільки найкращий інструмент - це передусім високоефективні технологічні рішення, що дають змогу замовникам компанії досягати відмінних результатів обробки.

2.2.1 Фреза CoroMill 345

Для фрезерування всієї Ланки вибираємо фрезу CoroMill 345 Ø 214 з головним кутом у плані 45°.

- Фреза призначена для загального призначення при фрезеруванні
- Передбачається менше вібрацій на великому вильоті
- Підвищується продуктивність за рахунок більш тонкої стружки

**Конфіденційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 30.06.2025р.**

Рисунок 2.5 – Фреза CoroMill 345

CoroMill 345 - це нова торцева фреза з кутом у плані 45°, здатна забезпечити найвищу економічну ефективність торцевого фрезерування. Цей передовий інструмент був спроектований для високопродуктивного фрезерування з малими і середніми значеннями глибин різання. Оброблюваними матеріалами для нової фрези є всі групи матеріалів від ISO-P до ISO-S. Торцева

фреза CoroMill 345 вирізняється плавним процесом обробки та низьким шумом. Вона оснащується восьми-гранними ріжучими пластинами унікальної конструкції, що дають змогу домогтися найвищої економічності та продуктивності обробки. Розповсюджене останнім часом використання безлюдних технологій у виробництві вимагає інструменту підвищеної надійності і передбачуваності в роботі. Нова фреза CoroMill 345 повною мірою відповідає цим вимогам сучасного виробництва - вона забезпечує безперебійну роботу з мінімальним часом незапланованих простоїв обладнання.

Переваги:

- Двостороння пластина забезпечує економічність і продуктивність обробки. При цьому досягається висока якість обробленої поверхні. Унікальний дизайн базового гнезда і опорної пластини

- Захист пластини від пошкодження стружкою - під час роботи з великою глибиною різання сусідня ріжуча кромка на пластині залишається неушкодженою.

Нові фрези комплектуються пластинами зі сплавів GC1030 і GC4230 легкої та середньої геометрії.

Сплав GC1030.

Сплав з PVD покриттям нітрид-титану, що представляє перший вибір для обробки в нестабільних умовах різання. А саме, обробка довго-кромочними фрезами, проблема пакетування стружки, обробка високих уступів, фрезерування з великим вильотом і точіння фрезеруванням. Виступає як гарне рішення для операцій, що вимагають підвищеної міцності сплаву. Пластини зі шліфованими ріжучими кромками з цього сплаву є першим вибором для фрезерування в'язких матеріалів, таких як низьковуглецеві сталі.

Сплав GC4230.

Широкоуніверсальний твердий сплав з покриттям нітрид-титану з гарним балансом надійності та продуктивності. Рекомендується для легкого і важкого фрезерування (з використанням MOP і без) нелегованих і низьколегованих сталей. Перший вибір для операцій торцевого фрезерування та оптимізований варіант для високопродуктивної обробки уступів.

Ця фреза є оптимальнішою за якістю та продуктивністю, порівняно з фрезою без покриття.

2.2.2 Свердло CoroDrill 880

Свердло зі змінними пластинами, що складається з міцної Ланки, в якій закріплюються центральні та периферійні ріжучі пластини з універсальною конструкцією Step Technology™ (ступінчаста технологія), що забезпечує чудовий баланс сил різання. CoroDrill® 880 гарантує високу ефективність при обробці всіх груп матеріалів.

Переваги:

- До 100% підвищення продуктивності
- Висока точність отвору і хороша якість поверхні

Для обробки деталі «Ланка» на свердлильній операції, використовуємо Свердло CoroDrill 880 Ø 12,2; Свердло CoroDrill Delta-C R840 Ø 5,1; Свердло CoroDrill Delta-C R840 Ø 7,1; Свердло CoroDrill Delta-C R840 Ø 1,9.

Технічні особливості:

- Міцна конструкція ріжучої пластини для підвищеної надійності обробки в нестабільних умовах
- Надійна альтернатива для обробки отворів діаметром менше ніж 24 мм (0,945")
- Ідеальне рішення для використання в якості інструменту, що не обертається
- Пластини з двома ріжучими кромками
- Універсальна геометрія для всіх груп оброблюваних матеріалів
- Зміцнений наклепом корпус свердла для підвищення втомної міцності
- Широкий діапазон радіального регулювання
- Можливості зворотного розточування і обробки фасок

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

Область застосування

- Від низьких до середніх подач
 - Нестабільні умови, що вимагають міцних ріжучих пластин із жорстким закріпленням
 - Як інструмент, що не обертається
- Сплави для центральної пластини GC1044:



Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

ЗНС
міц.

ості та
високу

Сплави для периферійної пластини GC4044, GC4014.

Для периферійної пластини вибір сплавів ширший, оскільки швидкість різання і умови варіюються в більшому діапазоні. Сплав GC4044 - найміцніший, а сплав GC4014 - найбільш зносостійкий.

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

Дріс
TiAlN чо
стійкість до утворення наросту.

криття
кість і

Таким чином за рахунок впровадження прецизійного свердла ми отримуємо: Надійність і довговічність, проста і надійна заміна пластини, висока стійкість інструменту і висока хвилинна подача, чудова якість отвору, оптимізована евакуація стружки, зниження вартості виготовлення отвору.

2.3 Висновки щодо впровадження сучасного інструменту з покриттям

нітрид-титану

Використання різального інструмента з покриттями на основі модифікованого нітриду титану забезпечує істотний економічний ефект порівняно з інструментом без покриття та з базовими покриттями TiAlN,

TiZrN і TiSiN під час оброблення заготовок із конструкційних сталей на операціях фрезерування та свердління.

Встановлено, що застосування розроблених двоелементних покриттів на основі модифікованого нітриду титану збільшує стійкість різального інструменту під час оброблення заготовок зі сталі 35 у 1,3 - 2,3 раза порівняно з базовими покриттями TiAlN, TiZrN та TiSiN та у 3,2 - 5,5 раза порівняно з покриттям TiN.

На підставі цього були отримані графіки залежностей швидкості та подачі від стійкості інструменту:

Оскільки швидкість різання визначається за формулою:

$$V = \frac{\pi D n}{1000}, \text{ м/хв} \quad (2.1)$$

де $\pi = 3,14$; D - діаметр кола, на якому перебуває розглянута точка головної ріжучої кромки, мм. D - діаметр оброблюваної поверхні заготовки; n - частота обертання оброблюваної заготовки, хв⁻¹.

Швидкість різання є одним з основних параметрів режиму різання, що визначають продуктивність обробки, яку можна виміряти кількістю заготовок, оброблених за одиницю часу, і може бути виражена співвідношенням:

$$\Pi = \frac{1}{t_{шт}} \quad (2.2)$$

де $t_{шт}$ – штучний час обробки заготовки, хв.

Штучний час визначають за формулою:

$$t_{шт} = t_0 + t_в + t_{орг} \quad (2.3)$$

де t_0 – основний (машинний) час, витрачений верстатом на обробку поверхні заготовки різанням, хв; $t_в$ - допоміжний час, витрачений на маніпуляції з верстатом, пристосуванням, заготівлею, різальним і вимірювальним інструментами, хв; $t_{орг}$ - час на обслуговування верстата (змащування, очищення від стружки, налагодження інструменту, ...), хв.

Вплив швидкості різання на продуктивність обробки видно з аналізу формули основного часу:

$$t_0 = \frac{L}{nS} i, \quad (2.4)$$

де L – довжина різання з урахуванням величин врізання і перебігу, мм; n – частота обертання заготовки, хв⁻¹; S – подача, мм/об; i – число проходів.

Беручи до уваги, що $i = h/t$ (тут h – величина припуску на бік, мм; t – глибина різання, мм), а $n = 1000v/\pi D$, отримуємо:

$$t_0 = \frac{LnDh}{1000vSt}. \quad (2.5)$$

Звідси випливає, що зі збільшенням швидкості різання основний час зменшується, а отже, збільшується продуктивність механічної обробки. Але зі збільшенням швидкості різання підвищується інтенсивність зношування інструменту, для цього і був обраний в даній роботі інструмент з покриттям нітрид-титану, який забезпечує довгостроковість інструменту (рис. 2.5).

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

Коефіцієнт підвищення стійкості різального інструменту з покриттям GC1030 порівняно з покриттям T5K10 за швидкості різання 160 м/хв дорівнює 1,60, а за швидкості різання 220 м/хв - 1,80. Зміна подачі також впливає на період стійкості інструменту. Так при подачі $S=0,11$ мм/об коефіцієнт підвищення стійкості покриття GC1030 склав 1,20, а при подачі $S=0,30$ мм/об період стійкості збільшився до 1,40, порівняно з покриттям T5K10 (рис 2.6).

Як видно з рис 2.5 коефіцієнт підвищення стійкості різального інструменту з покриттям GC1030 порівняно з покриттям T5K10 за швидкості різання 160 м/хв дорівнює 1,60, а за швидкості різання 220 м/хв - 1,80. Зміна подачі також впливає на період стійкості інструменту. Так при подачі $S=0,11$ мм/об коефіцієнт підвищення стійкості покриття GC1030 склав 1,20, а при подачі $S=0,30$ мм/об період стійкості збільшився до 1,40, порівняно з покриттям T5K10 (рис 2.6).

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

Як видно з малюнка 2.6, коефіцієнт підвищення стійкості різального інструменту з покриттям GC4014 порівняно з покриттям P6M5 зростає у 2,3-2,8 разів. Зміна подачі також впливає на період стійкості інструменту.

Коефіцієнт підвищення стійкості інструменту з покриттям GC4014 становив 1,30-1,60 порівняно з покриттям T5K10.

Можна зробити висновок, що інструмент із покриттям нітрид-титану сприяє підвищенню продуктивності механічного оброблення кор-пусних деталей.

2.4 Вибір методів обрібки поверхонь (МОП) деталі

Маршрут обробки деталі «Ланцюг»

Поверхня деталі	Квалітет	Шорсткість R_a , мкм	Переходи механічної обробки
$\varnothing 166 f7 \begin{pmatrix} -0.043 \\ -0.083 \end{pmatrix}$	7	0,8	Чорнове точіння Напівчистове точіння Чистове точіння шліфування
$R33 \begin{pmatrix} +0.8 \\ -0.3 \end{pmatrix}$	15	3,2	Одноразове фрезерування
$R28 \begin{pmatrix} +0.8 \\ -0.3 \end{pmatrix}$	16	3,2	Одноразове фрезерування
$R13 \begin{pmatrix} +0.8 \\ -0.2 \end{pmatrix}$		3,2	Чорнове фрезерування Чистове фрезерування
$\varnothing 12 H9 \begin{pmatrix} +0.03 \\ 0 \end{pmatrix}$	9	1,6	Чорнове точіння Чистове точіння Тонке точіння
$\varnothing 128 \begin{pmatrix} +0.25 \\ 0 \end{pmatrix}$		3,2	Чорнове фрезерування Чистове фрезерування
$\varnothing 137 F9 \begin{pmatrix} +0.143 \\ +0.043 \end{pmatrix}$	9	1,6	Чорнове фрезерування Чистове фрезерування Тонке фрезерування
$\varnothing 152 H9 \begin{pmatrix} 0.1 \\ 0 \end{pmatrix}$	9	1,6	Чорнове фрезерування Чистове фрезерування Тонке фрезерування
$\varnothing 147 \pm 1$		3,2	Одноразове фрезерування
$\varnothing 132 H7 \begin{pmatrix} +0.04 \\ 0 \end{pmatrix}$	7	0,8	Чорнове фрезерування Чистове фрезерування Тонке фрезерування
$\varnothing 145 H7 \begin{pmatrix} +0.04 \\ 0 \end{pmatrix}$	7	0,8	Чорнове фрезерування Чистове фрезерування Тонке фрезерування
$6_{-0.1}$		1,6	Чорнове фрезерування Чистове фрезерування Тонке фрезерування

Поверхня деталі	Квалітет	Шорсткість R_a , мкм	Переходи механічної обробки
7±0,5		1,6	Одноразове фрезерування
28±0,5		3,2	Одноразове фрезерування
3 ⁺¹		3,2	
8 H9(^{+0.036} ₀)	9	1,6	Чорнове фрезерування Чистове фрезерування Тонке фрезерування
14,5 h11(⁰ _{-0.11})	11	1,6	Одноразове фрезерування
15 ^{+0.5}		3,2	Чорнове фрезерування Чистове фрезерування
12 h11(⁰ _{-0.11})	11	3,2	Чорнове фрезерування Чистове фрезерування
15±0,5		3,2	Одноразове фрезерування
30±0,3		3,2	Чорнове фрезерування Чистове фрезерування
150 _{-0.2}		1,6	Чорнове фрезерування Чистове фрезерування
35 H7(^{+0.062} ₀)	7	0,8	Чорнове фрезерування Чистове фрезерування Тонке фрезерування
70±0,5		3,2	Одноразове фрезерування
127±0,2		1,6	Чорнове фрезерування Чистове фрезерування
68±0,5		1,6	Одноразове фрезерування
13±0,5		3,2	Одноразове фрезерування
120 H9(^{+0.087} ₀)	9	0,8	Чорнове фрезерування Чистове фрезерування Тонке фрезерування

2.5 Побудова 3D моделі деталі з використанням Autodesk PowerSHAPE. Розрахунок автоматизованої механічної обробки деталі у САМ-системі PowerMILL

Тривимірна модель деталі «Ланка» (рис.2.8) побудована в САД-системі Autodesk PowerSHAPE згідно з робочим кресленням підприємства (рис. 2.7).

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

У САМ-системі Autodesk PowerMILL було спроектовано механічне оброблення деталі «Ланка».

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

CONFIDENTIAL INFORMATION

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

**Конфіденційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 30.06.2025р.**

Рисунок 2.11 – Фрезерування торцевою фрезою поверхні -1,
у розмір $29 \pm 0,5$;

Ріжучий інструмент:

Фреза D=63 R220.29-0063-10.4A; пластина - RPHT2006MOT-ME12,
сплав – F40M;

Оправка – BT50SEMC22-100.

**Конфіденційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 30.06.2025р.**

у розмір $34\pm 0,5$;

Інструмент:

Фреза D=63 R220.29-0063-10.4A; пластина - RPHT2006MOT-ME12,
сплав – F40M; Оправка – BT50SEMC22-100

**Конфіденційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 30.06.2025р.**

Інструмент:

Фреза D=63 R220.29-0063-10.4A; пластина - RPHT2006MOT-ME12,
сплав – F40M; Оправка – BT50SEMC22-100.

**Конфіденційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 30.06.2025р.**

Конфіденційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 30.06.2025р.

у розмір $34 \pm 0,5$;

Інструмент:

Фреза D=63 R220.29-0063-10.4A; пластина – RPHT2006MOT-ME12,
сплав – F40M;

Оправка – BT50SEMC22-100

Конфіденційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 30.06.2025р.

у розмір $34 \pm 0,5$;

Інструмент:

Фреза D=63 R220.29-0063-10.4A; пластина - RPHT2006MOT-ME12,
сплав – F40M;

Оправка – BT50SEMC22-100.

3. СПЕЦІАЛЬНИЙ РОЗДІЛ

3.1 Проектування спеціального верстатного пристосування

Спеціальне верстатне пристосування проектується для операції фрезерування торцевих поверхонь в розмір 28мм та 26мм і розфрезерування отворів $\Phi 120$ мм та $\Phi 12$ мм, застосовуючи гідравлічні переналаштовувані лещата зі спеціальними губками .

3.1.1 Розрахунок точності верстатного пристосування

Точність верстатного пристосування визначається за умовою

$$\varepsilon < [\varepsilon]$$

де $[\varepsilon]$ - допустима величина похибки пристосування, мкм;

ε - дійсна величина похибки під час обробки,

Допустима величина похибки залежить від прийнятої схеми базування, величини допуску на розмір і похибок механічної обробки

$$[\varepsilon_a] = IT - K_y \cdot \omega$$

$$[\varepsilon_a] = 340, \text{ мкм}$$

де $IT=500$ -допуск на виконуємий розмір;

$K_y = 0,8$ - коефіцієнт посилення точності обробки;

ω - середньо економічна точність під час розточування, що дорівнює 200 мкм.

Дійсна похибка пристосування

$$\varepsilon = \sqrt{\varepsilon_a^2 + \varepsilon_z^2 + \varepsilon_{\pi}^2}$$

где ε_a - похибка базування (мкм);

ε_z - похибка закріплення, мкм;

ε_{π} - похибка положення, мкм

$$\varepsilon_a = 0,5IT_D + IT_d + \Delta_{\text{гар}}$$

где $IT_D=500$ мкм- допуск деталі,

$IT_d=25$ мкм- допуск на пристосуванні,

$\Delta_{\text{гар}}=0,02$ - гарантований зазор між деталлю й оправкою.

$\varepsilon_a=295$ мкм

$\varepsilon_z=0$, т.я. лінія дії сили закріплення перпендикулярна напрямку розміру, який виконується;

$\varepsilon_{\pi}=0$, т.я. похибка зносу настановних елементів пристосування дорівнює нулю.

3.1.2 Розрахунок сил затиску

Сила затиску для оправки визначається за формулою

$$P_3 = \frac{[KR_2 + 0,5R_1(f_1 - f_2)]}{f_1 + f_2}$$

$$K = K_0 K_1 K_2 K_3 K_4 K_5 K_6$$

$$K=3,24$$

$K_0=1,5$ - гарантований коефіцієнт запасу,

$K_1=1,2$ - коефіцієнт, який характеризує стан базових поверхонь заготовки,

$K_2=1,8$ - коефіцієнт, який характеризує затуплення ріжучого інструменту

$K_3=1$ - коефіцієнт, який характеризує ударний характер процесу різання,

$K_4=1$ - коефіцієнт, який характеризує сталість сили затиску,

$K_5=1$ - коефіцієнт, який характеризує зручність використання затискного механізму, у разі використання мускульної сили,

$K_6=1$ - коефіцієнт, який визначає нерухомість схеми базування під час затиску заготовки в пристосуванні

$f_1=0,16$ - сила тертя в зоні контакту заготовки з опорами,

$f_2=0,16$ - сила тертя в зоні контакту заготовки із затискним механізмом,

R_1, R_2 - складові сили різання,

$$P_3=37,16 \text{ кН}$$

3.1.3 Розрахунок параметрів гідроциліндра

Діаметр поршня гідроциліндра двосторонньої дії для закріплення заготовки

$$d_n = 4 \cdot P_3 = 95,48 \text{ мм,}$$

де,

$P_3= 22312 \text{ Н}$, зусилля затиску;

$p = 6,3 \text{ МПа}$, робочий тиск;

$\eta = 0,93$, коефіцієнт корисної дії гідроциліндра.

На підставі розрахункових даних, як привід лещат, приймаємо стандартний гідроциліндр двосторонньої дії $\varnothing 100 \text{ мм}$,

3.1.4 Технічна характеристика гідроциліндра

Діаметр поршня - 100 мм;

Діаметр штока – 40;

Хід поршня не більше - 80 мм.

Реалізована сила на штоку гідроциліндра при робочому тиску 6,3 МПа:

штовхаюча -76,9 кН;

тянуча - 61,3 кН

3.1.5 Розрахунок пристосування на міцність

Розрахунок пристосування на міцність проводиться за найбільш слабкою ланкою під час передачі зусилля затиску від гідроциліндра на деталь. Найбільш слабкою ланкою є болти кріплення, що працюють на розрив. Міцність болта перевіряємо за умовою

$$G_p = \frac{4 \cdot P}{\pi \cdot d^2} \leq [G_p];$$

де,

P = 8,5 кН, сила діюча на опору;

d₁=8,2 мм, внутрішній діаметр різьби.

Розрахунок:

$$G_p = \frac{4 \cdot 8500}{3,14 \cdot 8,2^2} = 162,2 \text{ МПа.}$$

4. НАУКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ

4.1 Вплив елементів режиму різання на період стійкості різального інструменту зі зносостійкими покриттями на основі модифікованого нітриду титану

Дослідження впливу елементів режиму різання на період стійкості ріжучого інструменту зі зносостійкими покриттями були взяті з робіт, проведених доктором технічних наук, професором Табаковим В.П. проводили при фрезеруванні заготовок зі сталі 30ХГСА і 12Х18Н10Т. Як зносостійкі покриття використовували багатоелементні покриття на основі модифікованого нітриду титану: TiAlZrN, TiAlSiN, TiZrAlN, TiZrSiN, TiSiAlN, TiSiAlN, TiSiZrN, TiSiCrN. Покриття наносили на пластини з твердого сплаву МК8 і швидкорізальної сталі Р6М5К5. Період стійкості різального інструменту визначали за його часом роботи до утворення фаски зносу на задній поверхні, що дорівнює для різальних пластин зі швидкорізальної сталі $h_3 = 0,6$ мм; для різальних пластин із твердого сплаву $h_3 = 0,4$ мм.

Стійкісні випробування проводили з використанням методу повногофакторного експерименту (ПФЕ). При цьому варіювали швидкість різання V і подачу на оберт S за постійної глибини різання, з огляду на її менший вплив на зношування різального інструмента. За результатами досліджень було побудовано графіки залежностей періоду стійкості різального інструменту з багатоелементними покриттями на основі модифікованого нітриду титану від швидкості різання (мал.4.1,а, 4.2,а, 4.3,а і 4.4,а) і подачі (мал. 4.1,4, 4.2,6, 4.3,6 і 4.4,6).

Встановлено, що під час обробки заготовок зі сталі 30ХГСА застосування покриттів TiAlN, TiZrN і TiSiN підвищує період стійкості твердосплавного інструменту в 1,60 - 2,81 раза порівняно з покриттям TiN (рис. 4.1). При цьому найбільше підвищення періоду стійкості забезпечує покриття TiSiN. Як видно з мал. 4.1, зі зростанням швидкості різання ефективність твердосплавного інструменту з покриттями складного складу зростає (коефіцієнт підвищення стійкості K_t для різального інструменту з покриттям TiAlN порівняно з інструментом із покриттям TiN зростає з 1,60 за швидкості $V = 160$ м/хв до 2,14 за швидкості $V = 220$ м/хв; для різального інструменту з покриттями TiZrN і TiSiN - відповідно з 1,60 до 2,16 і з 1,84 до 2,81). Зі збільшенням подачі, коефіцієнт підвищення стійкості змінюється менш істотно (для інструменту з покриттям TiAlN порівняно з покриттям TiN він зростає з 1,68 під час різання з подачею $S = 0,11$ мм/об до 1,78 під час різання з подачею $S = 0,3$ мм/об; для інструменту з покриттями TiZrN і TiSiN - відповідно з 1,67 до 1,76 і з 1,92 до 2,34).

Застосування трьохелементних нітридних покриттів дає змогу істотно підвищити період стійкості інструменту з твердого сплаву порівняно з інструментом з відповідним базовим покриттям (TiAlN, TiZrN або TiSiN відповідно). Більш висока працездатність інструменту з такими покриттями

пов'язана з їхніми високими фізико-механічними властивостями та циклічною тріщиностійкістю, а також сприятливішим тепловим і напруженим станом ріжучого клина інструменту та покриття (розділ 2).

**Конфіденційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 30.06.2025р.**

180 м/хв, $t = 0,5$ мм

Як видно з рис. 4.1, застосування трьохелементних нітридних покриттів порівняно з базовими двоелементними покриттями збільшує період стійкості твердосплавного ріжучого інструменту під час оброблення заготовок зі сталі 30ХГСА в 1,30 - 2,27 разів залежно від складу покриття і режимів різання. Найбільше підвищення періоду стійкості інструменту забезпечують покриття TiSiAlN і TiAlSiN, коефіцієнт підвищення стійкості для яких порівняно з покриттям TiN становив $K_j = (3,2 - 5,5)$. Найменшу ефективність мають покриття TiSiCrN і TiAlZrN, використання яких порівняно з покриттям TiN збільшує період стійкості ріжучого інструмента у 2,48 - 3,85 разів. Зі збільшенням швидкості різання ефективність багатоелементних покриттів зростає. Так, наприклад, коефіцієнт підвищення стійкості різального інструменту з покриттям TiAlZrN порівняно з покриттям TiAlN за швидкості різання 160 м/хв дорівнює 1,60, а за швидкості різання 220 м/хв - 1,80. Зміна подачі чинить менш істотний вплив на період стійкості ріжучого інструменту. Так при фрезеруванні заготовок з подачею $S = 0,11$ мм/об коефіцієнт підвищення стійкості для покриття TiAlZrN становив 1,63, а при різанні з подачею $S = 0,3$ мм/об період стійкості інструменту збільшився в 1,69 раза порівняно з базовим покриттям TiAlN. Для покриттів TiSiN, легованих цирконієм і хромом, збільшення подачі практично не впливає на зміну коефіцієнта підвищення стійкості. Стосовно покриття TiN ефективність трьохелементних покриттів на основі модифікованого нітриду титану зі збільшенням швидкості

різання і подачі зростає істотніше. Наприклад, зі зростанням швидкості різання з $V = 160$ м/хв до $V = 220$ м/хв коефіцієнт підвищення стійкості різального інструменту з покриттям TiAlZrN порівняно з покриттям TiN зростає з 2,54 до 3,85, а зі збільшенням подачі з $S = 0,11$ мм/об до $S = 0,3$ мм/об - з 2,74 до 3,01. За підвищенням періоду стійкості розроблені покриття можна розташувати в такий ряд: TiSiCrN, TiAlZrN, TiZrSiN, TiSiZrN, TiZrAlN, TiAlSiN, TiSiAlN.

Під час обробки заготовок зі сталі 30ХГСА швидкорізальним інструментом отримано аналогічні результати (рис. 4.2). Так, для інструменту з базовими покриттями TiAlN, TiZrN і TiSiN період стійкості порівняно з покриттям TiN збільшився в 1,60-2,62 раза залежно від режимів різання і складу покриття. При цьому для покриттів складного складу спостерігається збільшення коефіцієнта підвищення стійкості зі зростанням швидкості різання і подачі. Залежно від складів і режимів різання застосування трьохелементних нітридних покриттів додатково збільшує стійкість швидкорізального інструменту в 1,30 - 2,44 раза порівняно з інструментом з базовими покриттями. Залежно від складів і режимів різання застосування трьохелементних нітридних покриттів додатково збільшує стійкість швидкорізального інструменту в 1,30 - 2,44 раза порівняно з інструментом із базовими покриттями.

**Конфіденційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 30.06.2025р.**

$v = 0,15$ мм; $u = v = 55$ м/хв, $l = 0,15$ мм

Найбільшою мірою період стійкості різального інструменту підвищують покриття TiAlSiN і TiZrSiN (коефіцієнт підвищення стійкості порівняно з покриттям TiN становив $K_x = (2,97 - 5,74)$). Найменшу ефективність мають покриття TiSiCrN і TiSiZrN, підвищуючи період стійкості різального інструменту в 2,08 - 4,07 раза порівняно з покриттям TiN. Також як і для твердо-

сплавного інструменту з підвищенням швидкості різання і подачі ефективність застосування покриттів складу $TiMe_1Me_2N$ збільшується.

Так, наприклад, нанесення покриття $TiZrAlN$ підвищує період стійкості швидкорізального інструменту під час фрезерування зі швидкістю різання 50 м/хв у 1,67 раза порівняно з покриттям $TiZrN$, а зі швидкістю різання 70 м/хв - у 2,11 раза. Збільшення подачі чинить менший вплив на зміну коефіцієнта підвищення стійкості під час використання цього покриття: під час роботи з подачею 0,15 мм/об величина $K_x = 1,49$, а з подачею 0,3 мм/об - $K_t = 1,78$. Порівняно з покриттям TiN ефективність трьох-елементних покриттів із підвищенням режимів різання зростає ще більше. Наприклад, для різального інструменту з покриттям $TiZrAlN$ період стійкості порівняно з покриттям TiN збільшився в 2,99 раза при фрезеруванні зі швидкістю різання $V = 50$ м/хв і в 4,60 раза - зі швидкістю різання $V = 70$ м/хв. При фрезеруванні з подачею $S = 0,15$ мм/об коефіцієнт підвищення стійкості різального інструменту для покриття $TiZrAlN$ порівняно з покриттям TiN становив 2,50, а з подачею $S = 0,3$ мм/об - 3,17.

Зносостійкі трьохелементні покриття на основі модифікованого нітриду титану в порядку підвищення періоду стійкості швидкорізального інструменту під час обробки заготовок зі сталі 30ХГСА можна розташувати в наступний ряд: $TiSiCrN$, $TiSiZrN$, $TiZrAlN$, $TiAlZrN$, $TiSiAlN$, $TiZrSiN$, $TiAlSiN$. Дещо інша послідовність ефективності покриттів при фрезеруванні швидкорізальним інструментом, на відміну від твердосплавного, пов'язана з тим, що процес різання відбувається за відносно низьких швидкостей і дії МОР. Такі умови різання позначаються на тепловому і напруженому стані ріжучого клина інструмента і покриття, на його циклічній тріщиностійкості і, отже, на інтенсивності зносу інструмента.

Результати досліджень працездатності різального інструмента зі зносостійкими покриттями на основі модифікованого нітриду під час обробки заготовок зі сталі 12Х18Н10Т представлені на рис. 4.3 и 4.4. Очевидно, має місце аналогічне підвищення періоду стійкості інструменту з трьохелементними нітридними покриттями порівняно з базовими покриттями $TiAlN$, $TiZrN$ і $TiSiN$, а також покриттям TiN . Однак порівняно з обробкою заготовок зі сталі 30ХГСА коефіцієнт підвищення стійкості різального інструменту з покриттями складу $TiMe_1Me_2N$ під час обробки заготовок зі сталі 12Х18Н10Т нижчий, що пов'язано з більш важкими умовами роботи інструменту - високими силовими навантаженнями та температурами, що виникають під час різання, а отже, більш високим тепло-напруженим станом у різальному клині інструменту і в покритті.

Застосування трьохелементних покриттів на основі модифікованого нітриду титану порівняно з базовими двоелементними покриттями підвищує період стійкості твердосплавного інструменту в 1,25-2,16 раза залежно від складів і режимів різання. У порядку зростання періоду стійкості покриття можна розташувати в такий ряд: $TiSiCrN$, $TiAlZrN$, $TiSiZrN$, $TiZrSiN$, $TiAlSiN$, $TiZrAlN$, $TiSiAlN$.

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

2 - TiSiN; 3 - TiZrN; 4 - TiAlN; 5 - TiSiCrN; 6 - TiSiZrN; 7 - TiSiAlN; 8 - TiZrSiN; 9 - TiZrAlN; 10 - TiAlSiN; 11 - TiAlZrN; а - $S = 0,3$ мм/об, $t = 0,5$ мм;
б - $V = 150$ м/хв, $t = 0,5$ мм

Найбільшу ефективність показують покриття, що мають більшу в'язкість руйнування за високої міцності зчеплення покриття з інструментальною основою, - TiSiAlN і TiZrAlN, які забезпечують підвищення періоду стійкості різального інструменту порівняно з покриттям TiN у 3,40-4,38 раз, а найменшу - TiSiCrN і TiAlZrN (у 2,50-3,63 раз).

З підвищенням швидкості різання і подачі також, як і під час обробки заготовок зі сталі 30ХГСА, ефективність застосування трьохелементних-нітридних покриттів порівняно з базовими покриттями і покриттям TiN також збільшується.

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

10 - TiAlN, 9 - TiZrN, 8 - TiSiN, 7 - TiAlSiN, 6 - TiAlN, 5 - TiN, 4 - TiN, 3 - TiN, 2 - TiN, 1 - TiN, a - V = 0,5 мм/об, t = 0,75 мм; б - V = 18 м/мин, t = 0,75 мм

Таблиця 4.1 Математичні моделі періоду стійкості різального інструменту з твердого сплаву МК8 з багатоелементними покриттями

Покриття	Оброблюваний матеріал	
	30ХГСА	12Х18Н10Т
TiN	$T = \frac{4,865 \cdot 10^{10}}{V^{4,5} \cdot S^{1,28}}$	$T = \frac{4,568 \cdot 10^8}{V^{3,79} \cdot S^{1,20}}$
TiSiN	$T = \frac{1,135 \cdot 10^8}{V^{3,16} \cdot S^{1,07}}$	$T = \frac{8,505 \cdot 10^7}{V^{3,28} \cdot S^{1,11}}$
TiZrN	$T = \frac{2,878 \cdot 10^8}{V^{3,39} \cdot S^{1,23}}$	$T = \frac{1,529 \cdot 10^8}{V^{3,45} \cdot S^{1,18}}$
TiAlN	$T = \frac{7,829 \cdot 10^8}{V^{3,58} \cdot S^{1,23}}$	$T = \frac{6,060 \cdot 10^7}{V^{3,25} \cdot S^{1,14}}$
TiSiCrN	$T = \frac{5,519 \cdot 10^8}{V^{3,41} \cdot S^{1,16}}$	$T = \frac{6,194 \cdot 10^7}{V^{3,19} \cdot S^{1,11}}$

TiSiZrN	$T = \frac{2,312 \cdot 10^8}{V^{3,14} \cdot S^{1,16}}$	$T = \frac{6,815 \cdot 10^7}{V^{3,14} \cdot S^{1,05}}$
TiSiAlN	$T = \frac{1,950 \cdot 10^8}{V^{3,13} \cdot S^{1,14}}$	$T = \frac{1,297 \cdot 10^7}{V^{2,79} \cdot S^{1,09}}$
TiZrSiN	$T = \frac{2,219 \cdot 10^8}{V^{3,21} \cdot S^{1,16}}$	$T = \frac{1,168 \cdot 10^8}{V^{3,23} \cdot S^{1,05}}$
TiZrAlN	$T = \frac{1,317 \cdot 10^8}{V^{3,10} \cdot S^{1,16}}$	$T = \frac{4,088 \cdot 10^7}{V^{3,02} \cdot S^{1,10}}$
TiAlSiN	$T = \frac{1,525 \cdot 10^8}{V^{3,12} \cdot S^{1,20}}$	$T = \frac{1,345 \cdot 10^7}{V^{2,81} \cdot S^{1,10}}$
TiAlZrN	$T = \frac{2,158 \cdot 10^8}{V^{3,23} \cdot S^{1,21}}$	$T = \frac{1,358 \cdot 10^7}{V^{3,04} \cdot S^{1,09}}$

Аналогічні результати отримано і під час обробки заготовок із нержавіючої сталі 12Х18Н10Т швидкорізальним інструментом зі зносостійкими покриттями (мал. 4.2). Залежно від складу покриттів і режимів різання коефіцієнт підвищення стійкості різального інструменту з трьохелементними покриттями на основі модифікованого нітридатитану становив 1,37 - 2,24 порівняно з базовими покриттями TiAlN, TiZrN, TiZrN, TiSiN і 1,80 - 3,81 порівняно з покриттям TiN.

Таблиця 4.2 Математичні моделі періоду стійкості різального інструменту зі швидкорізальної сталі Р6М5К5 з багатоелементними покриттями

Покриття	Обробуваний матеріал	
	30ХГСА	12Х18Н10Т
TiN	$T = \frac{6,945 \cdot 10^7}{V^{4,32} \cdot S^{1,79}}$	$T = \frac{1,197 \cdot 10^4}{V^{2,47} \cdot S^{1,09}}$
TiSiN	$T = \frac{3,036 \cdot 10^6}{V^{3,36} \cdot S^{1,66}}$	$T = \frac{5,434 \cdot 10^3}{V^{2,04} \cdot S^{1,02}}$
TiZrN	$T = \frac{1,351 \cdot 10^7}{V^{3,74} \cdot S^{1,70}}$	$T = \frac{7,456 \cdot 10^3}{V^{2,11} \cdot S^{1,00}}$

Продовження таблиці 4.2

TiAlN	$T = \frac{5,668 \cdot 10^6}{V^{3,47} \cdot S^{1,62}}$	$T = \frac{5,018 \cdot 10^3}{V^{2,04} \cdot S^{1,04}}$
TiSiCrN	$T = \frac{3,129 \cdot 10^6}{V^{3,25} \cdot S^{1,162}}$	$T = \frac{6,449 \cdot 10^3}{V^{1,99} \cdot S^{1,04}}$
TiSiZrN	$T = \frac{3,182 \cdot 10^6}{V^{3,20} \cdot S^{1,53}}$	$T = \frac{8,680 \cdot 10^3}{V^{1,93} \cdot S^{1,00}}$
TiSiAlN	$T = \frac{2,195 \cdot 10^6}{V^{3,04} \cdot S^{1,49}}$	$T = \frac{7,320 \cdot 10^3}{V^{1,93} \cdot S^{0,96}}$
TiZrSiN	$T = \frac{2,786 \cdot 10^6}{V^{3,09} \cdot S^{1,46}}$	$T = \frac{5,910 \cdot 10^3}{V^{1,87} \cdot S^{1,01}}$
TiZrAlN	$T = \frac{1,991 \cdot 10^6}{V^{3,04} \cdot S^{1,44}}$	$T = \frac{6,253 \cdot 10^3}{V^{1,88} \cdot S^{1,00}}$
TiAlSiN	$T = \frac{2,479 \cdot 10^6}{V^{3,04} \cdot S^{1,44}}$	$T = \frac{5,497 \cdot 10^3}{V^{1,81} \cdot S^{0,98}}$
TiAlZrN	$T = \frac{2,035 \cdot 10^6}{V^{3,03} \cdot S^{1,45}}$	$T = \frac{5,628 \cdot 10^3}{V^{1,87} \cdot S^{1,01}}$

Дослідженнями встановлено, що найбільшу ефективність забезпечують покриття TiAlSiN, TiZrAlN, TiZrSiN і TiAlZrN, тоді як покриття на основі нітриду титану і кремнію (TiSiAlN, TiSiZrN, TiSiCrN) - дещо меншу. При цьому найбільше підвищення періоду стійкості забезпечують покриття, що мають велику в'язкість руйнування, високу міцність зчеплення з інструментальною основою. У табл. 4.1 і 4.2 наведені математичні моделі періоду стійкості різального інструменту з твердого сплаву і швидкорізальної сталі з покриттями на основі модифікованого нітриду титану під час фрезерування заготовок зі сталей 30ХГСА і 12Х18Н10Т. Аналіз отриманих математичних моделей дає змогу зазначити, що нанесення зносостійких трьохелементних покриттів на основі модифікованого нітриду титану не змінює характеру залежності періоду стійкості ріжучого інструмента від режимів різання (швидкості різання і подачі). Однак ступінь впливу швидкості різання і подачі на величину періоду стійкості змінюється залежно від інструментального та оброблюваного матеріалів і складу покриттів. Загалом можна зазначити, що використання трьохелементних нітридних покриттів призводить до зниження впливу швидкості різання та подачі (зменшення показників ступеня x і y) на період стійкості ріжучого інструменту, порівнюючи з базовими покриттями TiAlN, TiZrN і TiSiN.

ВИСНОВКИ

Проведені дослідження показали високу ефективність покриттів на основі модифікованого нітриду титану для підвищення працездатності різального інструменту зі швидкорізальної сталі та твердого сплаву.

Варіюючи складом багатоелементного зносостійкого покриття, можна направлено змінювати його структурні параметри, фізико-механічні властивості, тріщиностійкість і, як наслідок, керувати інтенсивністю його зносу та працездатністю.

У результаті виконаної роботи отримано такі наукові висновки та практичні результати:

Проаналізувавши літературні джерела, доведено про високу ефективність застосування ріжучих інструментів зі зносостійкими покриттями, нанесеними методами ФОП і, зокрема, методом КІБ..

1. Використовувана технологія нанесення багатоелементних покриттів на основі модифікованого нітриду титану.

2. Встановлено, що введення до складу двоелементних нітридних покриттів другого легувального елемента призводить до істотної зміни їхніх структурних параметрів і фізико-механічних властивостей. При цьому вплив легуючих елементів на структурні параметри та фізико-механічні властивості покриттів на основі одно- і двоелементних нітридів є аналогічним, проте ступінь їхнього впливу для покриттів складного складу (TiAlN, TiZrN і TiSiN) є меншим порівняно з більш простим покриттям TiN.

3. Виявлено вплив складу багатоелементних покриттів на основі модифікованого нітриду титану на структурні параметри, фізико-механічні властивості та напружений стан покриття в процесі різання.

4. Доведено, що застосування багатоелементних покриттів на основі модифікованого нітриду титану знижує інтенсивність зношування як швидкорізального, так і твердосплавного різального інструменту - під час обробки заготовок зі сталі 30XГСА в 1,3 - 1,8 раза, а під час фрезерування заготовок зі сталі 12X18H10T - в 1,2 - 1,7 раза порівняно з інструментом із покриттями TiAlN, TiZrN і TiSiN. В умовах проведених досліджень найменшу інтенсивність спрацьовування різального інструмента забезпечують покриття TiAlN, леговані кремнієм і цирконієм, покриття TiCN, леговані алюмінієм і кремнієм, і покриття TiSiN, які містять алюміній, цирконій і хром. Запропоновано оптимальні склади, що забезпечують найменшу інтенсивність зносу різального інструменту. Застосування розроблених багатоелементних покриттів на основі модифікованого нітриду титану дає змогу збільшити стійкість різального інструменту під час оброблення заготовок зі сталі 30XГСА в 1,3 - 2,3 раза порівняно з базовими покриттями TiAlN, TiZrN і TiSiN та в 3,2 - 5,5 раза порівняно з покриттям TiN, а під час оброблення заготовок зі сталі 12X18П10Т-В - в 1,3 - 2,2 раза та в 1,8 - 4,4 раза відповідно.

5. Встановлено, що інструмент із багатоелементними покриттями на основі модифікованого нітриду титану фірми SANDVIK Coromant доцільно використовувати під час обробки з високими швидкостями різання та пода-

чами. При цьому може бути досягнуто найбільше підвищення періоду стійкості порівняно з базовими покриттями.

6. Розроблено рекомендації для раціонального застосування прогресивного інструменту, на певних стратегіях оброблення, під час автоматизованого розрахунку керуючих програм у САМ-системах.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Довідник користувача ЄКТС [Електронний ресурс].
<https://kpi.ua/files/ECTS.pdf> (дата звернення: 04.11.2017).
3. ДСТУ 3008:2015. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлювання.
4. ДСТУ 8302:2015. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання.
10. Освітньо-наукова програма вищої освіти для магістра спеціальності 131 Прикладна механіка / С.Т. Пацера, В.А. Дербаба, О.О. Богданов; Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Д. : НТУ «ДП», 2024. – 22 с.
11. Закон України «Про вищу освіту» [Електронний ресурс].
<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1556-18>.
12. Національна рамка кваліфікацій. [Електронний ресурс].
<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1341-2011-п>.
13. Стандарт вищої освіти України бакалаврського рівня. Галузь знань 13 Механічна інженерія. Спеціальність 131 Прикладна механіка. [Електронний ресурс].
<https://mon.gov.ua/storage/app/media/vishchaosvita/zatverdzeni%20standarty/2019/06/25/131-prikladna-mekhanika-bakalavr.pdf>.
20. Залога В.О., Зінченко Р.М. Система "PowerShape" Поверхневе моделювання: Метод. вказівки з курсів "Комп'ютерні технології у верстатобудуванні" та "Комп'ютерні технології в інструментальному виробництві". Суми : Сумський держ ун-т, 2010.
21. Залога В.О., Зінченко Р.М. Система "PowerShape" Створення САПР за допомогою макросів: Метод. вказівки з курсів "Комп'ютерні технології у верстатобудуванні" та "Комп'ютерні технології в інструментальному виробництві"/ Суми : Сумський держ ун-т, 2011.
22. Величко О.Г. Інноваційна діяльність у сферах техніки, технології, технічного регулювання і забезпечення якості: підручник / Величко О.Г., Должанський А.М., Віткін Л.М., Янішевський О.Е., Ключев Д.Ю.; Донецьк : Свідлер, 2010. – 120 с.
23. Лукінюк М.В. Автоматизація типових технологічних процесів: технологічні об'єкти керування та схеми автоматизації: навч. посіб. Київ : НТУУ "КПІ", 2008.