

Петров О. Д.Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Корбут Є. В.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ПІДВИЩЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТА ШЛЯХОМ МОДИФІКАЦІЇ ЙОГО РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ

У статті розглянуто методи підвищення працездатності різального інструменту шляхом нанесення зносостійких покриттів на робочі поверхні. Протягом останніх десятиліть розроблено різні методи підвищення зносостійкості ріжучого інструменту (PI). З'ясовано, що найбільшій актуальності набувають технології отримання на робочій поверхні ріжучого інструменту зносостійких та зміцнених покриттів високоенергетичною обробкою. Кожен із відомих в даний час методів мають свої переваги та недоліки, що обмежують сферу їх застосування. Визначено, що розробка ефективного, досить простого для освоєння в промисловому виробництві та економічного методу підвищення зносостійкості PI залишається актуальним науковим та практичним завданням. Розглянуто процеси руйнування PI у переважній більшості випадків починаються з робочих поверхневих зон. Робочі поверхні PI зазнають інтенсивного зношування, втомного та інших видів руйнування. З'ясовано, що надійність PI визначається головним чином зносостійкістю, яка залежить від фізико-механічних властивостей матеріалів та якості обробки сполучених поверхонь. Властивості інструментальних матеріалів, які використовують для виготовлення PI, залежить від хімічного складу та їх структури. При цьому визначальним для надійності та довговічності PI є структура та властивості поверхневих шарів. В даний час поширеним методом поверхневого зміцнення є створення функціональних тонких покриттів (плівок) на робочій поверхні PI. Покриття, що формується на поверхні, утворюється за рахунок хімічних реакцій та дифузійних процесів між структурними елементами матеріалу, парогазових сумішей, або струмопровідного середовища та електричного поля. У цьому випадку структура внутрішніх шарів матеріалу залишається незмінною. Покриття можуть формуватися при електроосажденні (хромування, нікелювання, оксидування та інші) та напиленні (газополумєневим, плазмовим, детонаційним та інших) частинок матеріалів. Отже, підвищення зносостійкості PI, як частини трибосистеми є актуальним науково-технічним завданням сучасного машинобудування. Це завдання належить до найбільш складних у науці та техніці, оскільки вимагає аналізу складних взаємопов'язаних процесів у зоні тертя, які можна вивчити і описати тільки на основі фундаментальних положень фізики, хімії, матеріалознавства.

Ключові слова: зносостійке покриття, ріжучий інструмент (PI), процес різання, PVD метод фізичного осаждення, CVD метод хімічного осаждення, дискретні покриття, композитні матеріали (КМ), полімерні композитні матеріали (ПКМ), покриття дискретної структури, якість поверхні, дефектний шар.

Постановка завдання. На сьогоднішній день різальний інструмент (PI) виготовляється з різних інструментальних матеріалів, таких як інструментальні сталі, тверді сплави, кераміка та інше. Кожен інструмент має свою середню стійкість – це час, після якого необхідно зупинити верстат, зняти зношений різальний інструмент і поставити інший. Стійкість інструменту, крім режимів різання, складається з багатьох так званих «інструментальних» факторів, у тому числі тип інструментального матеріалу, технологія виготов-

лення інструменту, характер заточування, властивості пари «оброблюваний матеріал – інструментальний матеріал» та інших. При обробці нових сучасних матеріалів стійкість інструментального матеріалу часто не задовольняє виробничим вимогам, тому інженери шукають способи підвищення стійкості різального інструменту різними методами. Найбільш продуктивний спосіб зміцнення різального інструменту, методами нанесення покриттів, завдяки якому стійкість інструменту зростає 1,5, ..., 4 рази [2]. Поверхня різального

інструменту піддається найбільшому зносу через безперервний контакт з іншими щільними структурами в тому числі абразивом. Питання використання різального інструменту з модифікованими робочими поверхнями у вигляді дискретних ділянок для обробки деталей із полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) на сьогодні недостатньо вивчене [3]. Проведений аналіз існуючих рішень та методів обробки для підвищення та забезпечення якості оброблюваної поверхні показав, що одним із перспективних напрямків вирішення проблеми є дослідження, що до модифікування робочої поверхні свердла, шляхом нанесення на нього покриття дискретного типу є актуальним. Використання в машинобудуванні, авіабудуванні композитних матеріалів (КМ) для дедалі більшої кількості деталей, виробів та вузлів вимагають вирішення питання про надійність з'єднань таких деталей та вузлів. Як наслідок, необхідність отримання якісних поверхонь після механічної обробки КМ. Якість поверхневого шару – важлива експлуатаційна характеристика, що впливає на якість спряжених поверхонь, їхню герметичність, довговічність та інше. Зменшення, після механічної обробки дефектів озитивним чином позначиться на надійності з'єднань. На сьогодні багато досліджень проводяться з пошуку нових за складом покриттів, які дозволять підвищити зносостійкість інструменту для обробки деталей з ПКМ і завдяки цьому – підвищити ефективність (технологічно та економічно) обробки без зниження якості отриманих виробів. Проте існуючі роботи проводились з покриттями суцільного типу [4], дослідження з дискретними поверхнями покриттів та впливу розміщення по тілу РІ даних дискретних покриттів на якість обробленої поверхні деталей з ПКМ не проводились і потребують подальших досліджень. Для забезпечення експлуатаційних характеристик виробу з ПКМ необхідно створити такі умови різання, при яких товщина дефектного шару була б мінімальна при його обробці. РІ з дискретними поверхнями покриттів має забезпечити рішення цієї задачі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасному машинобудуванні все частіше використовують композиційні матеріали з причини їх високої ефективності через полегшену вагу та чудову стабільність у порівнянні зі стандартними матеріалами [1]. Ця тенденція визначає створення виробниками різального інструменту нових лінійок інструментальних матеріалів, сплавів, покриттів та геометричних форм, що відповідають задачі з обробки композиційних матеріалів. Ці матері-

али повинні мати підвищену поверхневу зносостійкість і відносно високу міцність і в'язкість. До таких матеріалів відносяться, в першу чергу, матеріали, на які нанесено спеціальні високотверді і зносостійкі покриття. Покриття доцільно розглядати як своєрідне проміжне середовище, яке з одного боку може суттєво впливати і змінювати поверхневі властивості інструментального матеріалу, а з іншого – впливати на контактні процеси, деформації, сили і температури різання, спрямованість теплових потоків, термодинамічний стан різальної частини інструменту і т.ін. Керуючи властивостями покриттів шляхом варіювання його хімічним складом і будовою, можна змінювати основні характеристики процесу різання. Так покриття може сприяти зниженню тертя в зонах фрикційного контакту на передній і задній поверхнях інструменту і зменшенню потужності фрикційних джерел тепла, зниженню активності дифузійних процесів, що сприяє меншому зношуванню. Все це дозволяє, зрештою, керувати найважливішими вихідними параметрами процесу різання – зносом інструменту та якістю поверхневого шару оброблюваних деталей. Нанесення зносостійких покриттів на інструментальні матеріали дозволяє наблизитися до вирішення завдання створення «ідеального» інструментального матеріалу, що має високу зносостійкість у поєднанні з достатньою міцністю і в'язкістю.

Зазначені умови можна розглядати з трьох різних позицій: 1. З позиції експлуатаційної стійкості: покриття повинне бути стійким проти корозії та окислення; покриття повинне зберігати свої властивості при підвищених температурах; покриття не повинно мати різних дефектів, таких як пори, сторонні вклучення і т.ін.; покриття повинне мати високу межу витривалості. 2. З точки зору спеціальних характеристик по відношенню до оброблюваного матеріалу: твердість покриття повинна бути більш, ніж в 1,5–2 рази вище твердості оброблюваного матеріалу; матеріал покриття повинен мати низьку схильність до адгезії з оброблюваним матеріалом; матеріал покриття повинен мати мінімальну здатність до дифузійного розчинення в оброблюваному матеріалі; матеріал покриття повинен мати максимальну відмінність у кристалохімічній будові у порівнянні з оброблюваним матеріалом. 3. З точки зору спеціальних характеристик по відношенню до інструментального матеріалу, що визначаються умовами нанесення на інструментальний матеріал: матеріал покриття повинен бути максимально подібний з точки зору кристалохімічної будови з інструмен-

тальним матеріалом; матеріал покриття повинен мати мінімальні відмінності у фізико-механічних і теплофізичних властивостях з інструментальним матеріалом; мати мінімальну ймовірність для проходження твердофазних дифузійних реакцій з матеріалом інструменту при підвищених температурах різання.

Для забезпечення виконання зазначених позицій при розробленні та застосуванні методів нанесення і формування самих покриттів необхідно одночасно домагатися виконання наступних задач: 1. Мінімальної адгезійної взаємодії між оброблюваним матеріалом і покриттям; 2. Максимальної адгезійної взаємодії між інструментальним матеріалом і покриттям; 3. Забезпечити формування оптимальної товщини, співвідношення шарів для багатошарових покриттів, їх фазового складу, структури та фізико-механічних властивостей. Найбільш ефективно властивостями багатошарових і композиційних покриттів можна управляти за рахунок варіювання: хімічним складом; структурою окремих шарів; типом зв'язку з інструментальним матеріалом. У свою чергу зазначені властивості великою мірою залежать від методу нанесення покриттів і умов їх формування та стану матеріалу, на який наносять покриття. Зокрема, сильний вплив на структуру і дефектність покриттів, тип зв'язку з інструментальним матеріалом може надавати: субструктура поверхневого шару інструментального матеріалу, обумовлена попереднім обробленням, ступенем його деформування, спотвореннями кристалічної решітки, пов'язаної з наявністю вакансій, атомів впровадження та заміщення; забрудненість і газонасиченість поверхні інструментального матеріалу; напружений стан поверхневого шару інструменту; наявність в поверхневому шарі лінійних дефектів – дислокацій. Нанесення зносостійких покриттів змінює контактні характеристики процесу різання, впливає на тепловий та напружений стан ріжучого клину інструменту, що зрештою підвищує його працездатність. Нанесення покриттів суттєво змінює характеристики стружкоутворення та контактних процесів: зменшуються сили різання, коефіцієнт укорочення стружки та довжина контакту стружки з передньою поверхнею ріжучого інструменту.

Постановка завдання. Метою цієї статті є проаналізувати існуючі методи нанесення дискретних покриттів на тіло РІ та вплив використання цієї технології на якість механічної обробки деталей з КМ. Завданням дослідження є пошук шляхів забезпечення зносостійкості та зменшення абра-

зивного зносу ріжучої поверхні РІ використовуваного для механічної обробки деталей, вузлів та виробів з КМ таким чином, щоб товщина дефектного шару була б мінімальна.

Виклад основного матеріалу. Зносостійке покриття – шар матеріалу на поверхні інструментальної основи, який відрізняється за своїм кристалохімічним, фізико-механічним та теплофізичним властивостям від відповідних властивостей основи (тіла РІ). Основне призначення зносостійкого покриття – це підвищення періоду стійкості РІ шляхом збільшення мікротвердості, корозійної стійкості та термодинамічної стійкості поверхневого шару, а також зниження фрикційної взаємодії (коефіцієнта тертя) різального інструменту та оброблюваного матеріалу. Підвищення стійкості РІ веде до збільшення продуктивності за рахунок можливості роботи з високими швидкостями різання. Такі покриття використовуються як на твердих сплавах, так і на швидкорізальних, що розширяє технологічні можливості РІ [7].

Використання зносостійкого покриття дозволяє: 1. Значно підвищити період стійкості та надійність РІ; 2. Збільшити продуктивність процесів обробки різанням; 3. Скоротити питому витрату дорогих інструментальних матеріалів та дефіцитних елементів (вольфрам, молібден, тантал, кобальт) для їх виготовлення.

Зносостійкі покриття, нанесене на РІ, повинно відповідати цілій низці вимог [8] як саме: покриття повинно мати твердість, що в 1,5–2 рази перевищує твердість інструментального матеріалу; покриття, як правило, має нижчий коефіцієнт тертя проти інструментальним матеріалом; низьку схильність до адгезії з оброблюваним матеріалом і мінімальну схильність до дифузійного розчинення в оброблюваному матеріалі; бути стійким проти корозії та окислення; зберігати властивості при високих температурах. Кристалохімічні та фізико-механічні властивості покриття інструментального матеріалу повинні бути досить близькими і сумісними [9].

Всі покриття, що використовуються для нанесення на РІ [10], умовно можна класифікувати за складом (одноелементні та багатоелементні), за будовою (одношарові та багатошарові) і по типу зв'язку (адгезійні, дифузійні та адгезійно-дифузійні). Одноелементні покриття – це покриття на основі з'єднання одного тугоплавкого металу (наприклад, TiC, TiN, ZrN). Багатоелементні – на основі з'єднання двох і більше тугоплавких металів (наприклад, (Ti, Zr) N, (Ti, Cr) N, (Ti, Zr, Cr) N). Одношарові характеризуються постійним

складом, структурою та властивостями за обсягом покриття. Багат шарові – змінним складом, структурою та властивостями за обсягом покриття. Адгезійні характеризуються відсутністю перехідної зони між покриттям та інструментальною основою. Дифузійні – наявністю перехідної зони між покриттям та інструментальною основою, порівнянню з розмірів із товщиною покриття. Адгезійно-дифузійні перехідна зона між покриттям та інструментальною основою менше розміром, ніж товщина покриття.

Склад та властивості зносостійких покриттів значною мірою залежать від технології їх нанесення. Існує два основних метода нанесення зносостійкого покриття на PI [11]: Chemical Vapour Deposition (CVD) – метод хімічного осадження із газової фази; Physical Vapour Deposition (PVD) – метод фізичного осадження із газової фази. Також існує комбінація цих двох методів.

Як впливає з назви використовуваних процесів (PVD та CVD), вони ґрунтуються на різних по суті явищах. Кінцевий результат це – осадження з газової фази матеріалу покриття на підкладку.

Покриття методом CVD [12] широко використовуються для нанесення покриттів на тверді сплави. У цьому методі використовується осадження покриття при високій температурі (900...1100 °C) з газової фази. Такі температури виключають можливість застосування цього методу для інструменту з швидкорізальної сталі. Метод хімічного осадження (CVD) практично не має обмежень щодо хімічного складу покриттів. Усі присутні частинки можуть бути осаджені на поверхню матеріалу. Склад покриття залежить від парціального тиску газу та швидкості осадження покриття. При використанні CVD-методу хімічні реакції відбуваються в безпосередній близькості або на поверхні оброблюваного матеріалу. Переваги нанесення покриттів методами CVD: можна наносити покриття практично будь-якого хімічного складу; немає необхідності обертання деталей, що покриваються, покриття наноситься на всю поверхню виробу; однакова товщина покриття; товстий шар зносостійкого покриття; через високі температури процесу нанесення покриттів матеріал покриття частково дифундує з матеріалом основи. Недоліками методів CVD є значна вартість процесу; слабка адгезія покриття із основним інструментальним матеріалом; непридатні при гостро заточеному ріжучому інструменті, оскільки скругляють ріжучу кромку; інструменти з такими покриттями схильні до крихкого характеру зносу

(викрашування, сколювання ріжучої кромки і так далі).

Методи фізичного осадження покриттів (PVD) [13] універсальні з точки зору одержання гами одношарових і багат шарових покриттів практично будь-якого складу, у тому числі з алмазоподібною і нанорозмірною структурою. Нанесення покриттів методом PVD відбувається за невисокої температури (зазвичай до 500 °C), що не призводить до практичних обмежень за матеріалами (дозволяє зміцнювати інструменти з швидкорізальних сталей), однак, при цьому присутня невелика товщина (1,5–6 мкм). Покриття PVD методом мають більш високу тріщиностійкість і краще пристосовані для роботи з ударними навантаженнями

Таким чином, переваги нанесення покриттів PVD методами: міцніші адгезійні зв'язки покриття з основою; нижча температура нанесення, на відміну методів CVD; можливість отримання гостро заточених ріжучих кромки; відсутність впливу покриття на міцність матеріалу основи; у поверхневому шарі покриття виникають корисні напруження стиснення. Недоліком PVD покриттів є його досить мала товщина (товщина покриттів, що наносяться методами CVD може досягати 50 мкм). Всі методи (PVD) засновані [14] на отриманні в середовищі вакууму пара осаджуваного матеріалу в результаті впливу на виготовлений з цього матеріалу катод (мішень) різних джерел енергії – потужних високотемпературних нагрівачів, лазерного променя, електронних та іонних пучків.

Порівняльний аналіз методів [15]: 1. На противагу методу PVD, при якому тверді матеріали покриття переводяться в газоподібну фазу випаровуванням або розпорошенням, при CVD-методу в камеру для нанесення покриття подається суміш газів, причому для протікання необхідних хімічних реакцій потрібна температура до 1200 °C. Ця умова істотно обмежує кількість інструментальних матеріалів, на які можна нанести CVD-покриття. Якщо тверді сплави витримують такий нагрівання практично без наслідків, то термооброблені швидкорізальні сталі втрачають в результаті, відпуску свої властивості. 2. Процеси CVD відбуваються за тисків 100–1000 Па. Покриття наноситься на всю поверхню виробу. Відпадає необхідність обертання виробу як за методом PVD. Це одна з переваг CVD. Для отримання однакових властивостей всього покриття обсягом робочої камери (особливо великий) необхідно забезпечити оптимальні потоки газу. 3. Установки CVD, як правило, мають досить великі габарити. Для запобігання небезпеч-

ним викидає газів в атмосферу використовується спеціальна система фільтрів. 4. Завдяки високій температурі нанесення, що забезпечує часткову дифузію матеріалу, що наноситься в основу, покриття CVD характеризуються, кращою адгезією (зчеплюваністю).

Таким чином, область застосування двох основних методів нанесення покриттів визначається їх зазначеними вище властивостями. PVD- та CVD-методи також відрізняються за видом внутрішніх напружень у шарі покриття, що наноситься. При методі PVD мають місце стискаючі напруги, а при методі CVD – розтягуючі. Напруження розтягу покращують адгезію покриття та основи. Необхідно також приймати до уваги та обставина, що методи CVD менш чутливі до якості підготовки матеріалу перед нанесенням на його покриття, у той час як при методі PVD матеріал повинен піддаватися тривалому багатоступінчастому очищенню, інакше не можна гарантувати властивості покриття. Але не зважаючи на переваги методу CVD (простота завантаження, відсутність тривалої підготовки та необхідності повороту виробів у технологічному процесі) фізичне осадження PVD – популярніший за рахунок відносної дешевизни. Покриття в цьому випадку наноситься за рахунок випаровування або розпилення. Тобто вихідні тверді матеріали переводять у газову фазу. Потім за допомогою електромагнітного поля транспортуються до ріжучого інструменту, нагрітого до температури, що не перевищує 500 °C, де іонізований матеріал стикається і рівномірно конденсується на ріжучому інструменті. PVD покриття утворюється за рахунок конденсації металевої пари на поверхні пластини.

Також, використання CVD метода обмежено матеріалами інструментів на які вони наносяться. Так інструменти зі швидкорізальної сталі за вказаними причин обробляються лише методом PVD. Для інших інструментальних матеріалів частка покриття методом CVD становить близько 40 %. У табл. 1 для порівняння наведено основні характеристики методів PVD та CVD.

Поверхня різального інструменту піддається найбільшому зносу через часті контакти з іншими щільними структурами. Вибір покриття – дуже важливе питання, яке потребує комплексного підходу до його вирішення, оскільки обране покриття визначає умови роботи, впливає на сили тертя і хімічні процеси, що відбуваються в зоні різання, в результаті контакту оброблюваної поверхні та передньої поверхні інструменту. У зв'язку з цим науковим завданням є підібрати

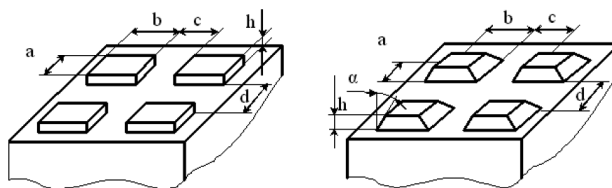
Таблиця 1

Порівняння параметрів методів CVD та PVD

Параметри	PVD	CVD
Параметри технології		
Тиск, Па	$< 10^2$	$> 10^2$
Температура основи, °C	< 500	> 500
Швидкість осадження	низька	висока
Адгезія	гірша	краще
Пори/тріщини	рідко	можливі
Залишкові напруження у нанесеному покритті	високі стискаючі	розтягуючі
Термічна обробка покриття після нанесення	потрібна термообробка для зняття напруги	не потрібно
Параметри виробництва		
Розмір партії	маленький	великий
Вимоги до обладнання	високі	низькі
Вартість	висока	низька

не тільки інструментальний матеріал для виготовлення інструменту, але й знайти оптимальне покриття – за твердістю, щільністю, зносостійкістю та іншими параметрами. Склад покриття слід обирати виходячи з аналізу навантажень, що діють на ріжучий інструмент у процесі різання, та властивостей оброблюваного матеріалу. Одне й те саме покриття в одних умовах експлуатації інструменту може забезпечити суттєве збільшення його стійкості, а інших – навіть показати негативний ефект.

Для деталей, які працюють у важких умовах, пропонується застосовувати захисні покриття дискретного типу і створювати на їх основі композиційні структури з мінімальним зносом [17]. Цілеспрямована заміна суцільного шару покриття переривчастим (фрагментованим) шаром [18] становить ідею принципу формування покриттів дискретного типу. Принцип створення дискретної топографії можна досить успішно реалізувати для PVD-покриттів (рис. 1), зокрема для покриттів, отриманих методом катодно-іонного бомбардування (КІБ) [19]. На рисунку 1. вказано параметри покриттів, які підлягають регулюванню.

**Рис. 1. Схеми дискретних покриттів**

Дискретизація дозволяє зберегти екрануючу функцію суцільних покриттів та уникнути таких

недоліків покриттів суцільного типу, як когезійне розтріскування та адгезійне відшарування. Застосування покриттів дискретного типу показало їх високу ефективність на різальному інструменті. При обробці високоміцних сталей металорізальний інструмент з дискретними нітридтитановими покриттями показав значне підвищення зносостійкості порівняно з суцільними покриттями [18]. На основі аналізу результатів чисельного моделювання напруженого стану різального інструменту з суцільним та дискретним покриттям TiN автори [19] роблять висновки про вплив типу покриття та його геометричних параметрів на розподіл напружень на робочих поверхнях інструменту та обґрунтовують підвищення міцності та зносостійкості дискретного покриття порівняно із суцільним в 3...5 разів для передньої грані та в 1,1...2 рази – для задньої грані інструменту. Дискретне РЕП – покриття, що складається з нітридної фази ϵ – Ti₂N, на різцях із швидкорізальної сталі, за даними [21], дозволяє на 46 % підвищити стійкість та на декілька відсотків знизити силу різання порівняно з інструментом із суцільним покриттям. Деякі варіанти схем з спеціальними покриттями (дискретного типу), які формуються на базі так званих функціонально-орієнтованих технологій, які забезпечують нові локальні властивості виробу з покриттям, пропонуються в роботі [20]. Пропонуються, зокрема, покриття з ділянками різної форми та товщини, які мають забезпечити, наприклад, різні схеми припрацювання поверхонь пари тертя, а також нетрадиційні характеристики при експлуатації різноманітних елементів машин. Однак, в роботі не наведено критеріїв, за якими мають створюватися такі покриття. Авторами [18, 19, 20] запропоновано новий принцип створення PVD-покриттів дискретного типу у вигляді каркасу або сітки з регулярними заглибленнями. Формування таких поверхонь реалізується за допомогою активних екрануючих паст. Незважаючи на бурхливий технологічний та практичний розвиток конструктивних схем переривчастої топографії, підходи щодо визначення параметрів таких схем, які б відповідали максимальному опору руйнуванню робочих поверхонь, розвинені недостатньо. При виборі технології модифікації робочих поверхонь одним з головних критеріїв є можливість на етапі проектування покриття, підготовки поверхні під його нанесення та формування покриття створювати конструктивні схеми із заздалегідь заданими геометричними параметрами, такими як: товщина, кількість шарів, розміри, форма та відстань між

окремими ділянками покриття, а також гнучкість технології формування покриттів. Було обрано наступні методи нанесення покриттів: різновид методу PVD – метод катодно-іонного бомбардування (КІБ); метод електроіскрового легування (ЕІЛ); методи, що ґрунтуються на обробці поверхні висококонцентрованими енергетичними джерелами (наприклад, плазмовим струменем).

Метод PVD КІБ (конденсації речовини з плазмової фази в вакуумі з попереднім іонним бомбардуванням) набув широкого розповсюдження методів формування покриттів на інструментальних матеріалах завдяки своїй універсальності, низьким температурам нанесення (нижче температури теплостійкості сталі), екологічній чистоті, можливості легко керувати режимами нанесення. Цей метод розроблено в Україні, і розповсюдженість устаткування типу «Булат» обумовлює його доступність. Технологія КІБ реалізується за допомогою прискорювачів плазми, які використовують вакуумну дугу – сильноточний низьковольтний розряд, який реалізується в глибокому вакуумі і розвивається в парах матеріалу катода. Ефективність метода КІБ обумовлена його унікальними особливостями: широким діапазоном питомих потужностей впливу на поверхню (від 0,1 до 10¹⁶ Вт/см²), високою керованістю, малою інерційністю процесу, швидкістю перебудови. Суттєвою особливістю методу КІБ є те, що за його допомогою створюють покриття дискретного типу різної геометрії, також створюють багат шарові покриття з функціональними шарами, покриття на основі дуплексних технологій, які дозволяють поєднувати нанесення вакуум-плазмового покриття з попереднім азотуванням сталевих поверхні на сталях та твердих сплавах. Для того, щоб залучити до досліджень всю сферу покриттів дискретного типу, поряд з штучно створюваними покриттями дискретного типу методом КІБ, розглянуто також такі, які є дискретними за своєю природою і можуть бути сформовані як включення в основу з іншого матеріалу, наприклад, методом електроіскрового легування (ЕІЛ), так і як зони, що утворилися внаслідок модифікації окремих ділянок основного матеріалу, наприклад, при обробці поверхні висококонцентрованими енергетичними джерелами (ВЕД). В якості попередньої обробки поверхні розглядалась механічна обробка (чорнове та чистове шліфування, полірування) та іонне азотування сталевих основи. Різноманітність запропонованих методів дозволила створювати системи «основа-покриття» з суцільними вакуум-плазмовими покриттями (одно- та

багатошаровими), дуплексні системи на основі поєднання іонного азотування (ІА) поверхні та методу КІБ, системи «основа – вакуум-плазмове покриття дискретного типу», а також системи з шарами, дискретно модифікованими методами ЕІЛ та ВЕД. Це обумовлює можливість зміцнювати деталі та інструмент з таких різних матеріалів як сталі, чавуни, тверді сплави, різальна кераміка, полікристалічні надтверді матеріали на основі кубічного нітриду бору, які мають різні розміри: від різальних пластин до великогабаритного валкового інструменту (табл. 2).

Таблиця 2

Матеріали та методи модифікації поверхонь та досліджуваних деталей

Матеріали основ	Матеріали покриття	Технологія нанесення	Деталі
Сталь Р6М5	TiN, (Ti, Al)N, TiCN, BK8	PVD, ІА+ PVD, ЕІЛ	різальний інструмент
Сталь У10А	BK6	ЕІЛ	штампи
Тверді сплави	TiN, (Ti, Al)N, TiCN	PVD	різальний інструмент
ПНТМ на основі cBN	Al ₂ O ₃ -NbN	PVD	різальний інструмент

Зносостійкі покриття на інструментальних матеріалах (швидкорізальній сталі, твердосплавних пластинах) формували шляхом конденсації матеріалу покриття в вакуумі іонним бомбардуванням на модернізованому устаткуванні ННВ-6,6-ІІ1.

Як вже зазначалось, тверді тонкі вакуум-плазмові покриття характеризуються високим рівнем залишкових напружень. Це свідчить, що, навіть за відсутності експлуатаційного навантаження, покриття і приповерхневі зони основи знаходяться в напружено-деформованому стані внаслідок невідповідності між покриттям та основою. Виділяють два механізми виникнення залишкових напружень: структурний та температурний. Структурні напруження в PVD-покриттях пов'язують з дефектністю при формуванні конденсату, вони є чутливими до мікроструктури покриття і залежать від умов конденсації, а також від часу нанесення, тобто від товщини покриття [15]. Температурна складова напружень обумовлена різницею коефіцієнтів температурного розширення матеріалів покриття та основи. PVD-покриттям, як правило, притаманні залишкові напруження стиску, які, в залежності від товщини покриття та матеріалу основи, можуть переходити в слабозтягуючі. Високий рівень залишко-

вих напружень стиску багато в чому обумовлює підвищення тріщиностійкості та зносостійкості поверхонь, модифікованих вакуум-плазмовими покриттями, а також позитивно впливає на такі характеристики, як границя витривалості та границя текучості. Разом з тим, значні за величиною залишкові напруження стиску роблять покриття більш крихким, можуть призводити до його спонтанного відшарування ще до початку експлуатації або до порушення зчеплення основи з покриттям в процесі експлуатації. Тому необхідність поглиблення уявлень про природу залишкових напружень в покриттях, а також визначення можливостей по керуванню їх рівнем з метою покращення характеристик та підвищення прогнозованості адаптаційних процесів в системі «основа-покриття» за рахунок удосконалення технології нанесення покриттів та створення відповідної конструкції поверхневого шару є очевидною.

Висновки. Оскільки CVD (хімічне осадження) покриття потребує складного обладнання, має високу вартість процесу, обмеження для інструментальних матеріалів, непридатне при гостро заточеному ріжучому інструменті, оскільки округляють ріжучу кромку, що є недопустимим при обробці ПКМ, тому більш технологічним виглядає метод PVD (фізичне осадження). Для методу PVD може бути використані як інструментальні сталі так і тверді сплави. Також, для зниження собівартості виготовлення інструменту з збільшеною зносостійкістю обираємо такий матеріал як швидкорізальну сталь Р6М5. Найбільш розповсюджене покриття отримане методом PVD, для матеріалу Р6М5 є TiN, (Ti, Al)N, TiCN, BK8. Отже підготовлена теоретична база для проведення досліду та подальшої механічної обробки з отриманням якісних поверхонь, що відповідає вимогам оброблення ПКМ з використанням дискретного покриття на свердлі з швидкорізальної сталі Р6М5, отриманого методом PVD.

Використання зносостійкого покриття РІ дозволяє: значно підвищити період стійкості та надійність ріжучого інструменту; збільшити продуктивність процесів обробки різанням, скоротити питому витрату дорогих інструментальних матеріалів та дефіцитних елементів (вольфрам, молібден, тантал, кобальт) для їх виготовлення; розширити область використання швидкорізальних сталей, які б не уступали твердим сплавам за рахунок нанесення дискретних покриттів; підвищити якість поверхневого шару і точність розмірів оброблених деталей.

Зміна контактних характеристик процесу різання відбивається на тепловому стані ріжучого клина інструменту. Нанесення покриттів призводить до зниження інтенсивності теплових джерел деформації та тертя передньої поверхні, в результаті чого зменшується інтенсивність теплового потоку в ріжучий клин інструменту з боку передньої поверхні. Зменшення кількості теплоти, що

надходить до інструменту з покриттям, внаслідок зниження довжини контакту та інтенсивності теплового потоку на передній поверхні, веде до зменшення інтенсивності теплового потоку через задню поверхню в заготовку. Дискретні поверхні дозволяють забезпечити необхідну надійність РІ в екстремальних умовах експлуатації, де суцільні захисні покриття втрачають свою працездатність.

Список літератури:

1. Лабунець В. Ф., Корбут Є. В., Адаменко Ю. І. Перспективи використання композиційних матеріалів в авіакосмічній галузі. *Проблеми тертя та зношування*. 2011. № 56. С. 89–96.
2. Уварова І. В., Лабунець В. Ф., Корбут Є. В., та інші. Дослідження зносостійкості композиційних електротлітичних покриттів на основі нікелю. *Порошкова металургія*. Київ. 2018. № 1.
3. Лабунець В. Ф., Медюк Р. М., Корбут Є. В., Загребельний В. В. Застосування подвійного дибориду титану-хрому для отримання захисних покриттів на нікелевій основі. *Порошкова металургія*. 2018. № 03\04. С. 117–124.
4. M. Kindrachuk, O. Dukhota, O. Tisov, E. Korbut, A. Yurchuk. Improving the wear resistance of heavy-duty elements in tribomechanical systems by a combined laser-thermochemical processing method. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. P. 6–13. ISSN 1729-3774 3/12 (111)
5. Wetzing K., Edelmann J., Gille G., et al. Structure, mechanical and stability behavior of hard material layers on steel substrates. *High-Purity Materials Sciences and Technologies*. 1985. P. 444–445.
6. Ляшенко Б. А., Мірненко В. І., Скуратовський А. К. Формування зносостійких поверхневих шарів газотермічним іонним азотуванням. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. *Машинобудування*. 2007. № 5. С. 139–146.
7. Кіндрачук М. В., Яхья М. С., Гераимова О. В. Напружено-деформований стан дискретно оброблених лазером сталей під час контактної взаємодії. *Науково-технічний збірник. Київ : Видавництво Національного авіаційного університету «НАУ друк»*. 2006. № 46. С. 29–39.
8. Безрукавий А. М., Мірненко В. І., Ляшенко Б. А. Оптимізація технологічного процесу нанесення дискретних покриттів електроіскровим легуванням за триботехнічними критеріями. *Проблеми тертя та зношування: Науково-технічний збірник. Київ : Видавництво Національного авіаційного університету НАУ*. 2007. № 47. С. 132–141.
9. Антонюк В. С., Сорока О. Б., Рутковський А. В., Мірненко В. І. Залишкові напруження в вакуум-плазмових покриттях TiN, (TiAl)N, (TiC)N/B. *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля*. Луганськ. 2004. № 7(77). Ч. 2. С. 206–210.
10. Bemporad E., Sebastiani M., Pecchio C. High thickness Ti/TiN multilayer thin coatings for wear resistant applications. *Surface & Coatings Technology*. 2006. Vol. 201. № 6. P. 2155–2165.
11. Антонюк В. С., Сорока О. Б., Ляшенко Б. А. Дискретні покриття на різальному інструменті. *Проблеми міцності*. 2007. № 1. С. 138–143.
12. Сорока Є. Б. Ensuring stability of PVD coatings by producing a discrete topography with preset parameters. *Journal of Superhard Materials*. 2009. Vol. 31. № 5. P. 347–353.
13. Сорока О. Б. Вибір параметрів дискретно-модифікованих зносостійких поверхонь. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»: Приладобудування. Київ: НТУУ «КПІ»*. 2007. № 33. С. 119–126.
14. Ляшенко Б. А., Антонюк В. С., Сорока О. Б. Розробка нових зносостійких покриттів для підвищення експлуатаційних характеристик деталей механізмів. *Вісник Тернопільського державного технічного університету ім. Івана Палюя*. – Тернопіль : ТДТУ ім. І. Палюя. 2005. Т. 10. № 1. С. 54–59.
15. Tool coating AIDS titanium cutting. *Metalwork PROD*. 1991. Vol. 135. № 12. P. 28.
16. Bunshah R.F. Handbook of Hard Coatings. Deposition Technologies, Properties and Applications. *University of California, Los Angeles*. USA. 2001. P. 538.
17. Gille G. Investigations of mechanical behavior of brittle wear-resistant coatings. *Thin Solid Films*. 1984. Vol. 111. № 3. P. 201–218.
18. Ляшенко Б. А., Єрмолаєв В. В., Мірненко В. І. Відновлення бронзових деталей диференційними дискретними покриттями по епюрі нерівномірного зносу. *Современные процессы механической обработки и качество поверхностей деталей машин: Збірник наук. праць Ін-ту надтвердих матеріалів НАН України. Київ : Ін-т надтвердих матеріалів НАН України*. 1998. С. 53–56.

19. Hua M., Tam H.Y., Ma H.Y., Mok C.K. Patterned PVD TiN spot coatings on M2 steel: Tribological behaviors under different sliding speeds. *Wear*. 2006. Vol. 260. № 11–12. P. 1153–1165.
20. Сорока О.Б. Напружено-деформований стан твердосплавної різальної пластини з покриттям дискретного типу. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»: Приладобудування*. Київ : НТУУ «КПІ». 2008. №. 35. С. 91–96.
21. Сорока О.Б., Антонюк В.С., Рутковський А.В. Інструмент для важкооброблюваних матеріалів в виробництві ГТД. *Надійність і довговічність машин і споруд*. Київ. 2008. № 31. С. 157–161.

Petrov O. D., Korbut E. V. INCREASING THE PERFORMANCE OF A CUTTING TOOL BY MODIFYING ITS WORKING SURFACES

The article considers methods for increasing the efficiency of cutting tools by applying wear-resistant coatings to working surfaces. Over the past decades, various methods have been developed to increase the wear resistance of cutting tools (CT). It has been found that the most relevant technologies are those for obtaining wear-resistant and hardened coatings on the working surface of cutting tools by high-energy processing. Each of the currently known methods has its own advantages and disadvantages, which limit the scope of their application. It has been determined that the development of an effective, fairly simple to master in industrial production and economical method for increasing the wear resistance of CT remains an urgent scientific and practical task. The processes of CT destruction in the vast majority of cases begin with the working surface zones. The working surfaces of CT are subject to intensive wear, fatigue and other types of destruction. It was found that the reliability of the CT is determined mainly by wear resistance, which depends on the physical and mechanical properties of the materials and the quality of the processing of the mating surfaces. The properties of the tool materials used for the manufacture of CT depend on the chemical composition and their structure. At the same time, the structure and properties of the surface layers are decisive for the reliability and durability of the CT. Currently, a common method of surface strengthening is the creation of functional thin coatings (films) on the working surface of the CT. The coating formed on the surface is formed due to chemical reactions and diffusion processes between the structural elements of the material, vapor-gas mixtures, or a conductive medium and an electric field. In this case, the structure of the internal layers of the material remains unchanged. Coatings can be formed by electrodeposition (chromium plating, nickel plating, oxidation, etc.) and spraying (gas-flame, plasma, detonation, etc.) of material particles. Therefore, increasing the wear resistance of CT, as part of the tribosystem, is an urgent scientific and technical task of modern mechanical engineering. This task is one of the most difficult in science and technology, since it requires the analysis of complex interrelated processes in the friction zone, which can be studied and described only on the basis of fundamental principles of physics, chemistry, and materials science.

Key words: Wear-resistant coating, cutting tool (CT), cutting process, PVD physical deposition method, CVD chemical deposition method, discrete coatings, composite materials (CM), polymer composite materials (PCM), discrete structure coating, surface quality, defective layer.