

Підвищення стійкості фасонних фрез йонно-плазмовим напиленням

Increase of shaped cutters durability by ion-plasma evaporation

*В. М. Голубець, д-р техн. наук, О. Б. Гасій, канд. техн. наук,
І. М. Гончар, канд. техн. наук, В. І. Степанишин, канд. техн. наук*
Національний лісотехнічний університет України, Львів, Україна

Мета. Дослідження зносо- та корозійної стійкості фасонних фрез із інструментальної сталі з розробленими покриттями. Підтвердження доцільності застосування цих покриттів для підвищення ресурсу роботи різального інструменту.

Методи дослідження. Покриття наносили на установці для йонно-плазмового напилення «Булат-3Т» з одного або двох випаровувачів при струмі дуги 70—200 А, тиску газу — 0,1—0,5 Па, опорній напрузі — 150—200 В, температурі підкладки — 300—450°C. Дослідження зносостійкості проводили за схемою «клин-диск» на машині тертя М-22П конструкції ІПМ НАН України. Корозійну стійкість покриттів оцінювали за питомою швидкістю корозії. Електрохімічну оцінку властивостей покриттів проводили методом зняття поляризаційних кривих і за кінетикою електродних потенціалів. Для порівняння працездатності різних покриттів обрано коефіцієнт стійкості K , що є відношенням часу роботи інструменту з покриттям до перезаточування до часу роботи інструменту без покриття.

Результати. Для порівняння працездатності різних покриттів обрано коефіцієнт стійкості, що є відношенням часу роботи інструменту з покриттям до перезаточування до часу роботи інструменту без покриття. Результати досліджень показали, що найвищою стійкістю володіють чотиришарове покриття [(TiN+Ni) + TiN+(TiN+Ni) + TiN] і двошарове покриття [(TiN+Ni) + TiN] з верхнім шаром з TiN, які осажені на м'яких демпферних підкладках з нікелевою основою. Такі підшари мають низьку твердість, однак, будучи більш еластичними, зменшують термічні напруження. Стійкість інструменту зростає зі збільшенням кількості шарів в покритті.

Висновки. Встановлено, що коефіцієнт стійкості покриття (Ti-TiN + Ti-TiN) становить $K = 1,8$ проти $K = 1,4$ для (Ti-TiN); стійкість 4-шарового покриття [(TiN+Ni) + TiN+(TiN+Ni) + TiN] становить $K = 3,1$ проти $K = 2,6$ для двошарового [(TiN+Ni) + TiN]. Композиційне покриття Mo-Ni-N на основі молібдену не забезпечує суттєвого підвищення стійкості внаслідок низької твердості.

Ключові слова: вакуумні йонно-плазмові покриття, коефіцієнт стійкості, корозійна стійкість, зносостійкість.

Постановка проблеми

Подальше підвищення питомої потужності, надійності і довговічності сучасних машин і апаратів ставить нові, більш жорсткі вимоги до конструкційних матеріалів. У світовій практиці отримала достатньо широке розповсюдження прогресивна тенденція підвищення якості матеріалів нанесенням різного роду захисних покриттів. Створення захисних покриттів — кардинальне і економічно виправдане вирішення проблеми досягнення високої конструктивної міцності матеріалів та їх сумісності з робочим середовищем. Визначились основні області застосування більшості розроблених покриттів, зокрема:

- за місцем застосування: спряжені контактні поверхні деталей та вузлів машин і механізмів, пари тертя, які працюють при високих питомих навантаженнях, робочі контактні поверхні деталей, метало- і дереворізального, мірального та штампового інструменту і т.д.;
- за призначенням: зносостійкі, фрикційні і антифрикційні, корозійностійкі та інші.

Прогнозні оцінки показують, що при цілеспрямованому використанні таких покриттів річний національний металофонд може бути знижено на 20—25 %.

В порівнянні з іншими способами поверхневого зміцнення електрофізичні методи є одними з найбільш високотехнологічних та екологічно чистих засобів нанесення покриттів. З-поміж них за останні десятиріччя широко використовуються методи нанесення захисних покриттів у вакуумі. Із групи вакуумних технологій в основному на практиці використовуються технології осаження покриттів із парів та плазми металів,

отриманих шляхом термічного розпилення, катодного розпилення, реактивного електронно-променевого плазмового напилення (РЕП), активованого реактивного напилення (ARE), магнетронного напилення, реактивного іонізаційного напилення (Sputtering), йонно-плазмового напилення в умовах йонного бомбардування (КІБ) [1].

Специфіка умов експлуатації інструменту, деталей машин та технологічного оснащення характеризується тим, що під час роботи вони зазнають сукупного впливу механічних навантажень та робочих середовищ. В зв'язку з тим, що вакуумні йонно-плазмові покриття володіють високими фізико-механічними та експлуатаційними властивостями при малій товщині, точно відтворюють геометричні особливості поверхні основи, їх часто наносять на інструменти та деталі малих розмірів і складної конфігурації, які використовуються у технологічних процесах різноманітних виробництв, де вплив робочого середовища має велику питому вагу серед інших факторів, що спричиняють руйнування поверхні. Тому дослідження поведінки покриттів у таких є актуальним науково-технічним завданням.

Виділення невирішених частин проблеми

Незважаючи на достатньо широку гаму розроблених покриттів, актуальним залишається питання проведення досліджень впливу технологічних параметрів процесу КІБ і конструктивних особливостей нанесення покриттів на їх геометричні характеристики. Хоча опубліковано ґрунтовні роботи, присвячені оптимізації електрофізичних характеристик процесу та вдосконалення конструкції установок, недостатньо досліджень властивостей йонно-плазмових покриттів з позиції фізико-хімічної механіки матеріалів — наукового напрямку, що враховує при оцінюванні довговічності і несучої здатності матеріалів вплив зовнішнього середовища, або одночасної дії механічних навантажень і робочих середовищ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз існуючих методів нанесення вакуумних йонно-плазмових покриттів, етапів їх створення, дослідження будови і властивостей дозволяє зробити деякі наступні висновки і окреслити шляхи подальших досліджень в цій галузі. Відзначаючи суттєві переваги методу КІБ поряд з існуючими, враховуючи також наявність вітчизняного технологічного обладнання, а саме установок типу «Булат», основну увагу при розробці вакуумних йонно-плазмових конденсатів і дослідженні їх властивостей слід сконцентрувати в подальшому на методі конденсації речовини з плазмової фази в умовах йонного бомбардування.

Загальновідомим є той факт, що йонно-плазмові покриття, що наносяться методом КІБ, знайшли широке застосування для підвищення стійкості металорізального інструменту. Так, покриття з нітриду титану дозволяє зменшити на 2030 % силу тертя при різанні конструкційних сталей, на 1520 % — коефіцієнт усадки стружки і зусилля різання, понизити температуру в зоні різання, значно підвищити стійкість інструмента і продуктивність механічної обробки. На сьогоднішній день детально вивчено вплив параметрів процесу КІБ на властивості покриттів і основи, а також працездатність інструментів з покриттями на основі хімічних сполук TiN, ZrN, Mo₂N, TiC та іншими [2—5].

Викладення основного матеріалу

З метою перевірки працездатності деяких розроблених конструкцій вакуумних йонно-плазмових покриттів [6, 7] досліджено зносостійкість модульних фасонних фрез ($d = 110$ мм, $z = 12$) зі сталі Р6М5 без покриттів і з покриттями при нарізанні канавок бурових доліт зі сталі 20ХН3А. Результати досліджень показали (рисунок 1), що найвищою стійкістю володіють чотирьохшарове покриття [(TiN+Ni) + TiN+(TiN+Ni) + TiN, (№ 13+ № 2) + (№ 13 + № 2)] і двошарове покриття (TiN+Ni, № 14) + (TiN, № 2) (тут і далі — умовні номери покриттів наведено з таблиці 3.1 [1]) з верхнім шаром з TiN, які осаджені на м'яких демпферних підкладках з нікелевою основою. Такі підшари мають низьку твердість, однак, будучи більш еластичними, зменшують термічні напруження. Зі збільшенням кількості шарів в покритті зростає стійкість інструменту.

Критерієм оцінки працездатності різних покриттів обраний коефіцієнт стійкості, що є відношенням часу роботи інструменту з покриттям до перезаточування до часу роботи інструменту без покриття. Стійкість покриття (Ti-TiN + Ti-TiN) становить $K = 1,8$ проти $K = 1,4$ для (Ti-TiN); стійкість чотирьохшарового покриття [(TiN+Ni) + TiN+(TiN+Ni) + TiN] становить $K = 3,1$ проти $K = 2,6$ для двошарового [(TiN+Ni) + TiN]. Композиційне покриття (Mo-Ni-N, № 24) не забезпечує суттєвого підвищення стійкості внаслідок низької твердості.

Ефективність застосування покриття TiN (№2) підтверджено [8] також для підвищення стійкості на різних типах інших металорізальних інструментів при обробці сталей 40X13 та сталі Ст.3 (рисунок 2) у порівнянні з аналогічними операціями, коли застосовувався інструмент з твёрдосплавними пластинами T15K6 (коефіцієнт стійкості у випадку оброблення твердим сплавом становив в середньому 1,9).



Рисунок 1 — Стійкість дискових фасонних фрез із сталі P6M5 з покриттями при фрезеруванні сталі 20ХН3А

Досліджено також стійкість фасонних фрез із сталі 12X18H10T покриттями, отриманими за наступними режимами:

- йонне бомбардування Ti до температури підкладки $T=400^{\circ}\text{C}$ та наступне напылення TiN при $T=200\text{—}250^{\circ}\text{C}$ впродовж 60 хв;
- йонне бомбардування Ni і Ti в середовищі N_2 ($P = 0,3\text{—}0,4 \text{ Па}$) до температури підкладки $T = 400^{\circ}\text{C}$ та наступне напылення Ni в середовищі N_2 ($P = 0,3\text{—}0,4 \text{ Па}$) при $U = 200\text{—}350 \text{ В}$ до температури підкладки $T = 400^{\circ}\text{C}$ впродовж 60 хв;
- йонне бомбардування Ti і Ni в середовищі N_2 ($P = 0,3\text{—}0,4 \text{ Па}$) до температури підкладки $T = 600^{\circ}\text{C}$ та наступне напылення Ni ($P = 0,3\text{—}0,4 \text{ Па}$, $U = 200 \text{ В}$) впродовж 60 хв при трикратному підігріванні йонним бомбардуванням Ti і Ni в азоті через кожні 15 хв;
- йонне бомбардування підкладки Ni в N_2 ($P = 0,3\text{—}0,4 \text{ Па}$) при $U = 1,1 \text{ кВ}$ впродовж 3—5 хв до температури підкладки $T = 400^{\circ}\text{C}$ та наступне напылення Ni і Ti в середовищі N_2 ($P = 0,3\text{—}0,4 \text{ Па}$) при $U = 200\text{—}250 \text{ В}$ впродовж 60 хв.

Напылення на фрези цих покриттів дозволило підвищити їх ресурс роботи у 3—10 разів.

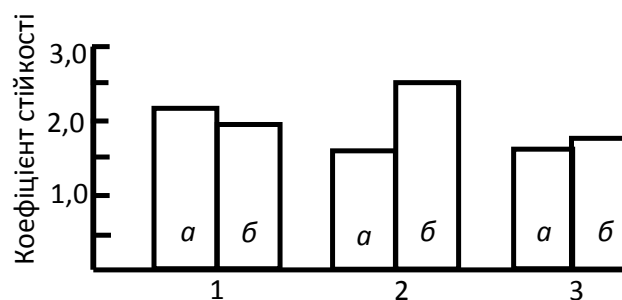


Рисунок 2 — Стійкість інструменту зі сталі P6M5 із покриттям із TiN (№2) при обробці сталі 40X13 (а) та сталі 3(б): 1 — свердла діаметром 8,6 мм; 2 — мітчики M8; 3 — фреза дискова діаметром 110х3 мм

При визначенні корозійно-механічної стійкості покриттів шляхом екстраполяції потенціодинамічних поляризаційних кривих отримано значення струмів саморозчинення при терті в умовах «жорсткої» води

($i_{тр}$) і в 3%-му розчині змащувально-охолоджуючої рідини (ЗОР) «Укринол-1» ($i'_{тр}$) (таблиця 1). Кількісно характеристика дії ЗОР як інгібітора, що сповільнює швидкість корозії, визначається ступенем захисту

$$Z = \frac{i - i'}{i} \cdot 100\%,$$

де i, i' — швидкість корозії без інгібітора і за наявності інгібітора відповідно.

Як видно із таблиці 1, у «жорсткій» воді електродні потенціали усіх покриттів при терті $\phi_{тр}$ змістились у порівнянні з $\phi_{ст}$ в додатну область на 30—100 мВ, що можна пояснити облегшенням катодного процесу завдяки більшому надходженню кисню при інтенсивному перемішуванні середовища, а також зниженням ролі анодного процесу внаслідок утворення пасивних захисних плівок.

Додавання до «жорсткої» води «Укринол-1» викликає гальмування як анодних, так і катодних процесів при терті всіх досліджуваних покриттів, за виключенням покриття з Ni (№ 16), де сповільнення катодних процесів немає. Більше сповільнення анодних реакцій в порівнянні з катодними призводить до значного зсуву електродних потенціалів $\phi_{тр}$ в анодну область (на 80—145 мВ). Швидкість корозійних процесів, які оцінюються за струмами саморозчинення, різко зменшується, що є проявом інгібувальної дії ЗОР.

Найбільший ефект гальмування корозійних процесів (до 90 %) спостерігається на покриттях з TiN (№ 3) і FeCr (№ 30) і значно менший (до 60 %) — на покриттях з Ni (№ 16) і Ti (№ 1). Для усіх досліджуваних покриттів додавання до «жорсткої» води емульсола призводить до суттєвого зменшення швидкості корозії. Дія компонентів ЗОР проявляється через їх адсорбцію на поверхні покриття, яка спричиняє зміну будови подвійного електричного шару, виникнення додаткового позитивного адсорбційного стрибка потенціалу і зменшення вільної поверхні металу, що кородує, та екранування її адсорбованим інгібітором [9, 10].

Водночас незалежно від електрохімічної природи металів наявність плівок, утворених складними фазовими оксидами ЗОР на їх поверхні (зокрема, на титані, нікелі), значно зменшує ефективність дії інгібіторів корозії [11], чим і пояснюється менший ступінь захисту на покриттях з Ti і Ni.

Таблиця 1 — Електрохімічні характеристики йонно-плазмових покриттів у досліджуваних середовищах

Покриття	Вода „жорстка”			3%-ний „Укринол-1”		Z, %
	$\phi_{ст}$, мВ	$\phi_{тр}$, мВ	$i_{тр}$, А/м ²	$\phi_{тр}$, мВ	$i'_{тр}$, А/м ²	
TiN (№3)	- 525	- 425	0,129	- 300	0,015	88
Ni (№16)	- 420	- 390	0,074	- 245	0,037	50
Ti (№1)	- 465	- 420	0,026	- 340	0,011	58
FeCr (№30)	- 490	- 440	0,107	- 340	0,012	89

Висновки

1. Встановлено, що коефіцієнт стійкості покриття (Ti-TiN + Ti-TiN) становить $K = 1,8$ проти $K = 1,4$ для (Ti-TiN); стійкість 4-шарового покриття [(TiN+Ni) + TiN+(TiN+Ni) + TiN] становить $K = 3,1$ проти $K = 2,6$ для двошарового [(TiN+Ni) + TiN]. Композиційне покриття Mo-Ni-N на основі молібдену не забезпечує суттєвого підвищення стійкості внаслідок низької твердості. Таким чином, натурні випробування фасонних фрез в промислових умовах підтвердили ефективність застосування вакуумних йонно-плазмових покриттів вищенаведеного складу для підвищення їх зносо- та корозійної стійкості.

2. Визначення ступеня захисту при терті покриттів в середовищі ЗОР дозволяє оцінити їх адсорбційні властивості, які впливають на схильність покриттів до адгезії з контртілом.

Література

1. Голубець, В. М. Захисні властивості і зносостійкість вакуумних йонно-плазмових покриттів / В. М. Голубець, О. Б. Гасій, Я. В. Щуйко. — Львів: ВТФ «Друксервіс», 2007. — 104 с.
2. Аксенов, И. И. Вакуумная дуга в эрозионных источниках плазмы / И. И. Аксенов. — Харьков: ННЦ ХФТИ, 2005. — 212 с.
3. Андреев, А. А. Вакуумно-дуговые устройства и покрытия / А. А. Андреев, Л. П. Саблев, В. М. Шулаев, С. Н. Григорьев. — Харьков: ННЦ ХФТИ, 2005. — 236 с.
4. Малихін, С. В. Механізми формування та процеси еволюції структури, напруженого стану і властивостей квазі- та нанокристалічних плівок металів під впливом зовнішніх чинників: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра фіз.-мат. наук: спец. 01.04.07 «Фізика твердого тіла» / Сергій Володимирович Малихін; Харківський нац. ун-т ім. В. Н. Каразіна — Харків, 2008. — 34 с.
5. Соболев, О. В. Закономірності формування та еволюції нерівноважного структурного стану іонно-плазмових конденсатів: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра фіз.-мат. наук: спец. 01.04.07 «Фізика твердого тіла» / Олег Валентинович Соболев; Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України — К., 2008. — 36 с.
6. Голубець, В. М. Зносостійкість інструментальної сталі Р6М5 з одношаровими йонно-плазмовими покриттями в умовах моделювання процесу різання / В. М. Голубець, О. Б. Гасій // Проблеми трибології. — 2005. — № 3. — С. 29—33.
7. Голубець, В. М. Лабораторні тестування двошарових йонно-плазмових покриттів для поверхневого зміцнення інструментальної сталі / В. М. Голубець, О. Б. Гасій // Проблеми трибології. — 2005. — № 4. — С. 178—185.
8. Голубець, В. М. Технологічні методи поверхневого зміцнення металічних конструкційних матеріалів / В. М. Голубець. — Львів: ВТФ «Друксервіс», 2000. — 178 с.
9. Антропов, Л. И. Ингибиторы коррозии металлов / Л. И. Антропов, Е. М. Макушин, В. Ф. Панасенко. — К.: Техніка, 1981. — 183 с.
10. Домаскин, Б. Б. Введение в электрохимическую практику / Б. Б. Домаскин, О. А. Петрий. — М.: Высшая школа, 1975. — 416 с.
11. Жук, Н. П. Курс теории коррозии и защиты металлов / Н. П. Жук — М.: Металлургия, 1976. — 472 с.

References

1. Holubets, V. M., Hasiy, O. B., & Shchuiiko, Y. V. (2007). Zakhysni vlastyivosti i znosostiikist vakuumnykh yonno-plazmovykh pokryttiv [*Protective properties and wear resistance of vacuum ion-plasma coatings*]. Lviv: VTF «Drukservis» [in Ukrainian].
2. Aksenov, I. I. (2005). Vakuumnaia duga v erozionnykh istochnikakh plazmy [*Vacuum arc in erosive plasma sources*]. Kharkov: NSC KFTI [in Russian].
3. Andreev, A. A., Sablev, L. P., Shulaev, V. M., & Grigoriev, S. N. (2005). Vakuumno-dugovye ustroistva i pokrytiia [*Vacuum-arc devices and coatings*]. Kharkov: NSC KFTI [in Russian].
4. Malykhin, S. V. (2008). Mekhanizmy formuvannia ta protsesy evoliutsii struktury, napruzhenogo stanu i vlastyivostei kvazi- ta nanokrystalichnykh plivok metaliv pid vplyvom zovnishnykh chynnykiv [*Mechanisms of formation and processes of the evolution of structure, stress state and properties of quasi-and nanocrystalline metal films under the influence of external factors*]. Extended abstract of Doctor's thesis. Kharkiv: Karazin Kharkiv National University [in Ukrainian].
5. Sobol, O. V. (2008). Zakonomirnosti formuvannia ta evoliutsii nerivnovazhnogo strukturnogo stanu ionno-plazmovykh kondensativ [*Patterns of formation and evolution of the nonequilibrium structural state of ion-plasma condensates*]. Extended abstract of Doctor's thesis. Kyiv: Kurdiunov Institute of Metal Physics of the NAS of Ukraine [in Ukrainian].
6. Holubets, V. M., & Hasiy, O. B. (2005). Znosostiikist instrumentalnoi stali R6M5 z odnosharovymy yonno-plazmovymy pokryttiamy v umovakh modeliuvannia protsesu rizannia [*Wear resistance of instrumental steel P6M5 with single-layer ion-plasma coatings in conditions of modeling of cutting process*]. Problemy trybologii — Problems of tribology, 3, 29—33 [in Ukrainian].

7. Holubets, V. M., & Hasiy, O. B. (2005). Laboratorni testuvannia dvosharovykh yonno-plazmovykh pokryttiv dlia poverkhnevoho zmitsnennia instrumentalnoi stali [*Laboratory testing of two-layer ion-plasma coatings for surface hardening of tool steel*]. Problemy trybologii — Problems of tribology, 4, 178-185 [in Ukrainian].
8. Holubets, V. M. (2000). Tekhnologichni metody poverkhnevoho zmitsnennia metalichnykh konstruktsiinykh materialiv [*Technological methods of surface strengthening of metal structural materials*]. Lviv: VTF «Drukservis» [in Ukrainian].
9. Antropov, L. I., Makushyn, & E. M., Panasenko, V. F. (1981). Ingibitory korrozii metallov [*Metal corrosion inhibitors*]. Kyiv: Tekhnika [in Russian].
10. Domaskin, B. B., & Petrii, O. A. (1975). *Vvedenie v elektrokhimicheskuiu praktiku* [Introduction to electrochemical practice]. Moscow: Vysshaia shkola [in Russian].
11. Zhuk, N. P. (1976). *Kurs teorii korrozii i zashchity metallov* [Theory course of corrosion and protection of metals]. Moscow: Metallurgia [in Russian].

Надійшла

УДК 620.178.16:620.193

Повышение стойкости фасонных фрез ионно-плазменным напылением

В. М. Голубец, А. Б. Гасий, И. Н. Гончар,
В. И. Степанишин

Цель. Исследование износо- и коррозионной стойкости фасонных фрез из инструментальной стали с разработанными покрытиями. Подтверждение целесообразности применения этих покрытий для повышения ресурса работы режущего инструмента.

Методы исследования. Покрытия наносили на установку для ионно-плазменного напыления «Булат-3Т» с одного или двух испарителей при токе дуги 70—200 А, давлении газа 0,1—0,5 Па, опорном напряжении - 150—200 В, при температуре подложки 300—450 мкм. Исследование износостойкости проводили по схеме «клин-диск» на машине трения М-22П конструкции ИПМ НАН Украины. Коррозионную стойкость покрытий оценивали по удельной скорости коррозии. Электрохимическую оценку свойств покрытий проводили методом снятия поляризационных кривых и по кинетике электродных потенциалов. Для сравнения работоспособности различных покрытий избран коэффициент устойчивости K , представляющий собой отношение времени работы инструмента с покрытием до перезаточки к времени работы инструмента без покрытия

Результаты. Результаты исследований показали, что самой высокой устойчивостью обладают четырехслойные покрытия $[(TiN + Ni) + TiN + (TiN + Ni) + TiN]$ и двухслойное покрытие $[(TiN + Ni) + TiN]$ с верхним слоем из TiN , которые осаждены на мягких демпферных подложках с никелевой основой. Такие подслои имеют низкую твердость, однако, будучи более эластичными, уменьшают тепловые напряжения. Стойкость инструмента возрастает с увеличением количества слоев в покрытии. Определение степени защиты при трении покрытий в среде СОЖ позволяет оценить их адсорбционные свойства, которые влияют на склонность покрытий к адгезии с контртелом.

Выводы. Установлено, что коэффициент стойкости покрытия $(Ti-TiN + Ti-TiN)$ составляет $K = 1,8$ против $K = 1,4$ для $(Ti-TiN)$; стойкость 4-слойного покрытия $[(TiN + Ni) + TiN + (TiN + Ni) + TiN]$ составляет $K = 3,1$ против $K = 2,6$ для двухслойного $[(TiN + Ni) + TiN]$. Композиционное покрытие $Mo-Ni-N$ на основе молибдена не обеспечивает существенного повышения устойчивости вследствие низкой твердости.

Ключевые слова: вакуумные ионно-плазменные покрытия, коэффициент устойчивости, коррозионная стойкость, износостойкость.

Increase of shaped cutters durability by ion-plasma evaporation

V. M. Holubets, O. B. Hasiy, I. M. Honchar,
V. I. Stepanyshyn

Aim. Research of wear and corrosion resistance of shaped cutters from tool steel with developed coatings. Confirmation of the expediency of the use of these coatings to increase the life of the cutting tool.

Methods of research. Coatings were applied to the unit for the ion-plasma sputtering «Bulat-3T» from one or two evaporators under an arc current of 70—200 A, a gas pressure of 0,1 — 0,5 Pa, a reference voltage of 150—200 V, a temperature of the substrate — 300 — 450 microns. The research of wear resistance was carried out according to the scheme «wedge disk» on the friction machine M-22P of the design of IPM of the National Academy of Sciences of Ukraine. The corrosion resistance of the coatings was estimated at a specific rate of corrosion. Electrochemical evaluation of the properties of the coatings was carried out by the method of removing polarization curves and kinetics of electrode potentials. To compare the performance of various coatings, the coefficient of resistance K , which is the ratio of the operating time of the tool with the coating to the re-setting to the time of the tool without coating, is chosen.

Results. The results of the studies showed that the four-layer coating [(TiN + Ni) + TiN + (TiN + Ni) + TiN] and the two-layer coating [(TiN + Ni) + TiN] with the upper layer of TiN that are deposited on the soft damper substrates with nickel base. Such substrates have low hardness, however, being more elastic, reduce thermal stresses. The stability of the tool increases with increasing number of layers in the coating. Determination of the degree of protection in the friction of coatings in the environment of lubricating coolant allows you to assess their adsorption properties that affect the tendency of coatings to the adhesion with the counterfilm.

Conclusions. It was established that the coefficient of stability of the coating (Ti-TiN + Ti-TiN) is $K = 1.8$ versus $K = 1.4$ for (Ti-TiN); the stability of the 4-layer coating [(TiN + Ni) + TiN + (TiN + Ni) + TiN] is $K = 3.1$ versus $K = 2.6$ for the two-layer [(TiN + Ni) + TiN]. The Mo-Ni-N composite coating on the basis of molybdenum does not provide a significant increase in stability due to low hardness.

Ключові слова: vacuum ion-plasma coatings, coefficient of stability, corrosion resistance, wear resistance.

Відомості про авторів

Голубець Володимир Михайлович

Національний лісотехнічний університет України

Адреса: вул. Ген. Чупринки, 105, 79057, м. Львів, Україна. Телефон +38 (067) 274-42-12

E-mail: golubets.volodymyr@gmail.com

Голубець Владимир Михайлович

Национальный лесотехнический университет Украины,

Адрес: ул. Ген. Чупринки, 105, 79057, г. Львов, Украина. Телефон +38 (067) 274-42-12

E-mail golubets.volodymyr@gmail.com

Holubets Volodymyr Mikhailovych

Natsionalnyi lisotekhnichniyi universytet Ukrainy

Address: vul. Gen. Chuprynyky 103, Lviv, Ukraine, 79057, office 602, telephone +38 (067) 274-42-12

E-mail: golubets.volodymyr@gmail.com

Гончар Іван Миколайович

Національний лісотехнічний університет України,

Адреса: вул. Ген. Чупринки, 105, 79057, м. Львів, Україна. Телефон +38 (097) 478-79-31

E-mail: gonchar0405@ukr.net

Гончар Иван Николаевич, доцент кафедри технології матеріалів і машиностроєння

Национальный лесотехнический университет Украины,

Адрес: ул. Ген. Чупринки, 105, 79057, Львов, Украина, телефон +38 (097) 478-79-31

e-mail: gonchar0405@ukr.net

Gonchar Ivan Mykolaiovych

Natsionalnyi lisotekhnichniy universytet Ukrainy

Address: vul. Gen. Chuprynky 103, Lviv, Ukraine, 79057, telephone +38 (097) 478-79-31

E-mail: gonchar0405@ukr.net

Степанишин Володимир Іванович

Національний лісотехнічний університет України

Адреса: вул. Ген. Чупринки, 103, м. Львів, 79057, Україна, телефон +38 (096) 348-77-22

E-mail: v.stepanyshyn@gmail.com

Степанишин Владимир Иванович, доцент кафедри технології матеріалів та машиностроєння

Национальный лесотехнический университет Украины

Адрес: ул. Ген. Чупринки, 103, г. Львов, 79057, Украина, телефон: +38 (096) 348-77-22

E-mail: v.stepanyshyn@gmail.com

Stepanyshyn Volodymyr Ivanovych, доцент кафедри технології матеріалів та машиностроєння

Natsionalnyi lisotekhnichniy universytet Ukrainy

Address: vul. Gen. Chuprynky 103, Lviv, 79057, Ukraine, telephone +38 (096) 348-77-22

E-mail: v.stepanyshyn@gmail.com

Гасій Олександр Богданович

Національний лісотехнічний університет України

Адреса: вул. Ген. Чупринки, 103, м. Львів, 79057, Україна, телефон +38 (063) 762-23-36

E-mail: o.hasiy@gmail.com

Гасій Олександр Богданович

Национальный лесотехнический университет Украины,

Адрес: 79057, г. Львов, ул. Ген. Чупринки, 105, каб. 310. Телефон +38 (063) 762-23-36

E-mail: o.hasiy@gmail.com

Hasiy Oleksandr

Natsionalnyi lisotekhnichniy universytet Ukrainy

Address: vul. Gen. Chuprynky, Lviv, 10379057, Ukraine, telephone +38 (063) 762-23-36

E-mail: o.hasiy@gmail.com