

УДК 621.793

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2023.103.0.72

## ОБРОБЛЕННЯ ПОВЕРХНІ ПІДКЛАДОК У ГАЗОВОМУ ВАКУУМНО-ДУГОВОМУ РОЗРЯДІ

Сердюк І. В.<sup>1</sup>, Столбовий В. О.<sup>2</sup>, Андрєєв А. О.<sup>1</sup>, Кривошопка Р. В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Національний науковий центр

«Харківський фізико-технічний інститут» НАН України

<sup>2</sup> Харківський національний автомобільно-дорожній університет МОН України

**Анотація.** Підготовка поверхні перед осадженням вакуумно-дугових покриттів має велике значення, оскільки впливає не тільки на адгезійні властивості отриманих покриттів, але й на фізико-механічні властивості поверхневого шару підкладки. Процеси взаємодії іонів з поверхнею підкладки за умови її іонного очищення перед осадженням покриттів досить мало досліджувались і майже не описані в літературі, тому в цій роботі розглядаються лише деякі їх особливості щодо підготовки поверхні матеріалів перед осадженням вакуумно-дугових покриттів. Характер взаємодії плазми з матеріалом підкладки визначається енергією іонів і щільністю їх потоку за інших рівних умов. Енергія іонів, що оброблює підкладку, передбачає їх початкову енергію та енергію, придбану в дебаївському шарі, що прилягає до підкладки, п'ять час додавання до неї негативного потенціалу. Значення потенціалу, коли процеси конденсації або розпилення врівноважуються, визначається здебільшого природою матеріалу, що випаровується. У разі збільшення значення потенціалу підкладки відбувається розпилення частинок, що осаджуються, та її матеріалу. Водночас вилучаються атоми підкладки, слабо пов'язані з нею, різні забруднення, підвищується температура підкладки, особливо в її поверхневих шарах. У роботі досліджено вплив різних металів і газів, що використовуються для очищення поверхні підкладок із кубічного нітриду бору  $PcBN$  та сталей, на морфологію поверхні. Установлено, що використання газів (аргону, азоту) для очищення поверхні діелектричних матеріалів, зокрема  $PcBN$ , показало найліпші результати, що в подальшому призводить до підвищення адгезійного зчеплення вакуумно-дугового покриття з підкладкою.

**Ключові слова:** вакуумно-дуговий розряд, поверхня, розпорошення, підкладка, морфологія.

### Вступ

Зміцнення поверхні різального інструмента та деталей вузлів способом використання вакуумно-дугових покриттів значно підвищує їх експлуатаційні властивості та продовжує ресурс роботи. Адгезійні властивості вакуумно-дугових покриттів суттєво залежать від якості підготовки поверхні підкладок, що піддаються зміцненню. Тому перед осадженням покриттів доцільно підготовлювати поверхню підкладки у вакуумі, що полягає в остаточному вилученні різних забруднень та прогріванні її поверхневого шару. Найбільш ефективним способом такої підготовки є активація поверхні підкладки обробленням прискореними іонами газів (аргоном, азотом тощо) або металів.

### Аналіз публікацій

Аналіз публікацій і досвід попередніх досліджень показав, що в процесі подання на підкладку високого негативного потенціалу відбувається іонне розпорошення поверхневого шару, вилучення різних забруднень і

впровадження в поверхню підкладки атомів матеріалу катоду, що випаровується (у разі оброблення металевими іонами) [1–3]. Оброблення іонами аргону забезпечує гарний ступінь очищення поверхні підкладки, проте в цьому разі не утворюється перехідна дифузійна зона так само, як і за умови катодного розпорошення.

У ситуаціях оброблення іонами металу, що випаровується, відбувається радіаційно-стимульована дифузія осаджуваної речовини в підкладку. Її атоми, маючи надмірну енергію, мігрують поверхнею підкладки, затримуючись у різних дефектах її структури, заповнюючи мікротріщини, що зі свого боку сприяє підвищенню міцності підкладки. Зокрема, після оброблення пластин із твердих сплавів іонами хрому або титану у високому вакуумі за умови потенціалу на підкладці –1000 В протягом декількох хвилин збільшується їх середня міцність на вигин на 10...15 % і знижуються варіаційні розкиди міцності на 40...80 % [1]. У цьому разі утворюється дифузійна зона завширшки до

2...2,5 мкм. Таке оброблення забезпечує високу адгезію покриття до підкладки, що досягає 20...25 МПа. Також для зменшення перегріву інструментів, особливо їх тонких різальних кромки, важливо встановити оптимальні значення потенціалів на підкладці під час іонної підготовки (очищення).

Значний вплив на ступінь очищення, а отже, адгезію майбутнього покриття до підкладки має тиск залишкового газу у вакуумній камері. На практиці в разі великих завантажень виробів у вакуумній камері та прагнення скоротити час виробничих процесів іонну підготовку поверхні виробів нерідко починають за відносно високих тисків залишкового газу в камері, що спричиняє істотне зниження адгезії покриттів на виробках.

Тому дуже важливо з'ясувати вплив залишкового тиску у вакуумній камері на стан поверхні підкладки.

На початку очищення підкладки іонним бомбардуванням на її поверхні зазвичай з'являються катодні плями внаслідок виникнення мікродугових розрядів між підкладкою та корпусом камери. Катодні плями цих розрядів мають ту саму природу, що й катодні плями на катоді дугового випарника і, залишаючи ерозійний слід, вони пошкоджують поверхню підкладки. Їх ініціюють джерела локальних газовиділень (ворсинки, залишки рідин, у яких промивають підкладку або мастила тощо), діелектричні плівки, оксиди, крупинки шаржованого абразивного матеріалу та інші джерела неконтрольованого забруднення поверхні підкладки.

Катодні плями також з'являються внаслідок збільшення щільності плазми безпосередньо біля підкладки. Зокрема, концентрація електронів біля підкладки вже на відстані 0,5 мм від неї зростає майже на порядок, навіть у високому вакуумі [1]. Імовірність появи та стійкість існування катодних плям збільшується зі зростанням тиску в камері, тобто частота їх появи та тривалість за умови тисків  $P = 1 \cdot 10^{-2}$  Па значно вищі, ніж у разі  $P = 1 \cdot 10^{-3}$  Па. Боротьба з ними проводиться з допомогою використання різних технологічних прийомів (короткочасні виключення блоку іонного очищення, включення в ланцюг підкладки коливальних контурів та ін.), однак зазначені заходи не усувають катодні плями повністю. Найбільш надійним способом боротьби з мікродугами є застосування високого потенціалу на підкладці у вигляді коротких імпульсів тривалістю кілька мікросекунд із такими самими паузами. За час

існування імпульсу катодна пляма не встигає розвинути та пошкодити поверхню підкладки, у цьому разі джерело появи може бути усунене. Подібні системи застосовуються для запобігання дуговим розрядам також під час азотування в тліючому розряді.

Технологічні методи боротьби з мікродугами передбачають ретельне промивання виробів (підкладок), їх прогрівання, бажано разом із підкладкоутримувачем, перед завантаженням у вакуумну камеру. Іонне очищення необхідно починати за умови тиску  $\sim 10^{-3}$  Па (спочатку короткими імпульсами з паузами, достатніми для забезпечення відкачування газів, що виділяються) і підтримки високого вакууму.

Після очищення іонним бомбардуванням і одночасного прогрівання підкладки до необхідної температури (зазвичай протягом декількох хвилин) негативний потенціал на підкладці знижують до значень, оптимальних для кожного виду покриттів, і осаджують їх [4–7].

### Мета та постановка завдання

Метою завдання є дослідження впливу різних металів і газів, що використовуються для очищення поверхні підкладок із кубічного нітриду бору *PcBN* та інших сталей, на морфологію їх поверхні.

Для досягнення поставленої мети необхідно розглянути умови оброблення поверхні підкладок різного складу іонами газів (аргону й азоту) та іонами металів (титану, цирконію, молібдену, хрому та сплаву *TiAlYCr*).

### Результати дослідження

Достатньо якісну підготовку поверхні підкладок перед нанесенням вакуумно-дугових покриттів можна також зробити способом її оброблення газовими іонами. У цьому разі необхідно брати до уваги певні фізико-хімічні властивості, що мають матеріали підкладки та покриття, що осаджується. Наприклад, нанесення зносостійких покриттів на діелектричні поверхні (різальні кераміки, кубічний нітрид бору) є достатньо складним завданням.

Очищення діелектричних поверхонь металевими іонами не можлива, оскільки відбувається осадження покриття, а не розпорошення та активація поверхні діелектрика, що зі свого боку призводить до слабкої адгезії покриття. Для очищення та активації поверхні необхідно застосовувати газову плазму дугового розряду. У газовому вакуумно-

дуговому розряді очищення здійснюється прискореними іонами газів, наприклад, азоту, аргону або інших, що дає змогу достатньо активувати різні діелектричні поверхні для забезпечення високої адгезії покриття.

Проведено відносне порівняння методу та матеріалів, що беруть участь в очищенні. Це металеві іони *Ti*, *Mo*, *Cr*, сплав *TiAlYCr* та газові іони: *Ar*, *N* (рис. 1). Як матеріали підкладок, поверхня яких піддавалася обробленню прискореними іонами, використовувались *P6M5*, нержавіюча сталь, титан, твердий сплав, кубічний нітрид бору. Час очищення для всіх методів становив 10 хв.

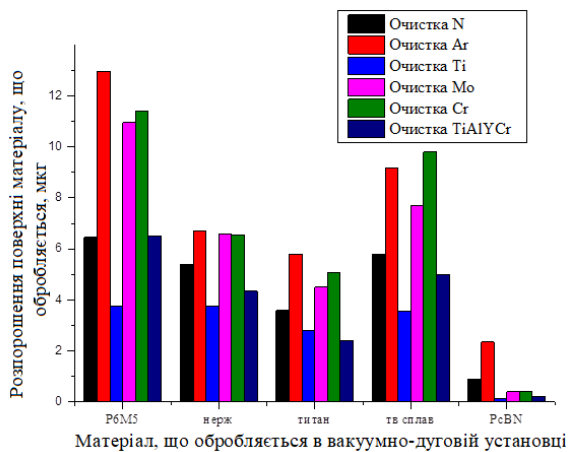
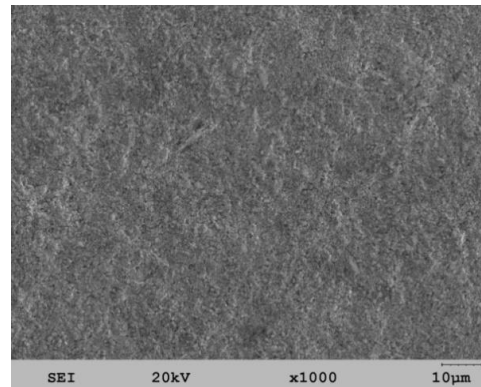


Рис. 1. Порівняння ступеня розпорошення поверхонь матеріалів: *P6M5*, нержавіюча сталь, титан, твердий сплав, кубічний нітрид бору залежно від іонів: *Ti*, *Mo*, *Cr*, *TiAlYCr*, *Ar*, *N*

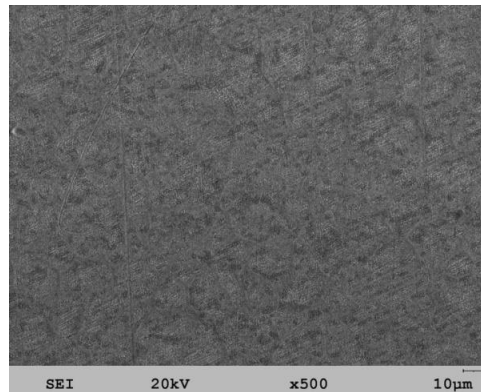
Визначено, що очищення іонами аргону можна порівняти з очищенням іонами хрому або молибдену. Але необхідно брати до уваги, що очищення іонами металів призводить до незначного осадження металу, який розпорошує поверхню підкладки. А оброблення іонами азоту металевих поверхонь дає змогу азотувати метали за температури близько  $T = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

На рис. 2–7 наведено фотографії поверхонь підкладок із різних металів і кубічного нітриду бору (*PcBN*) після очищення іонами металів та газів.

Застосування для очищення та активації поверхні підкладок іонів азоту (атомна маса 14,007 а.о.м.) призводить до формування однорідної структури поверхневого шару без його суттєвого розпорошення.

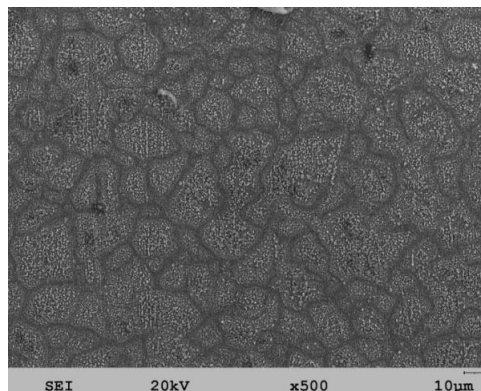


а

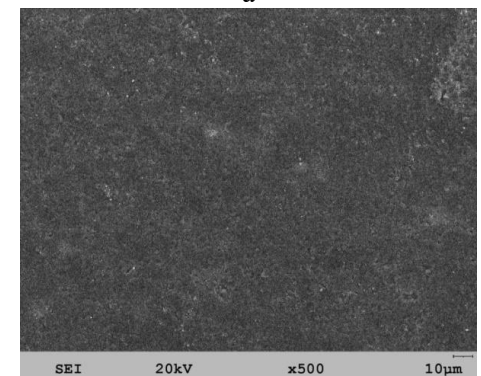


б

Рис. 2. Фотографії поверхонь металу (а) та кубічного нітриду бору (*PcBN*) (б) після очищення іонами азоту



а



б

Рис. 3. Фотографії поверхонь металу (а) та кубічного нітриду бору (*PcBN*) (б) після очищення іонами аргону

Використання для очищення та активації поверхні підкладок іонів аргону (атомна маса 39,948 а.о.м) призводить до формування більш гладкої поверхні із суттєвим розпорощенням поверхневого шару.

Застосування для очищення та активації поверхні підкладок іонів титану (атомна маса 47,88 а.о.м) призводить не тільки до розпорощення поверхневого шару, але й до появи значної кількості крапель різного розміру

(від 1 до 10 мкм) на поверхні, що зі свого боку значно погіршують якість підготовки поверхні.

Використання для очищення та активації поверхні підкладок іонів молібдену (атомна маса 95,94 а.о.м) призводить до суттєвого травлення поверхневого шару підкладки з металу без наявності крапель на поверхні, у разі очищення підкладки з *PcBN* спостерігається поява незначної кількості крапель на поверхні.

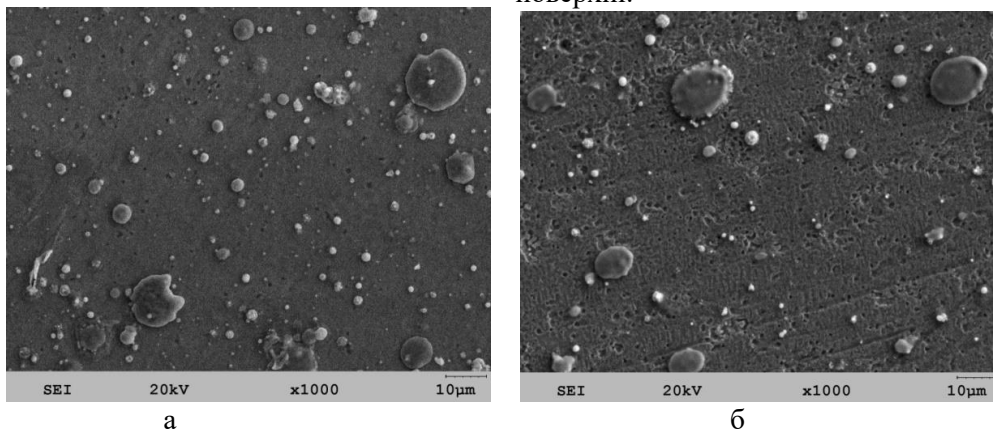


Рис. 4. Фотографії поверхонь металу (а) та кубічного нітриду бору (*PcBN*) (б) після очищення іонами титану

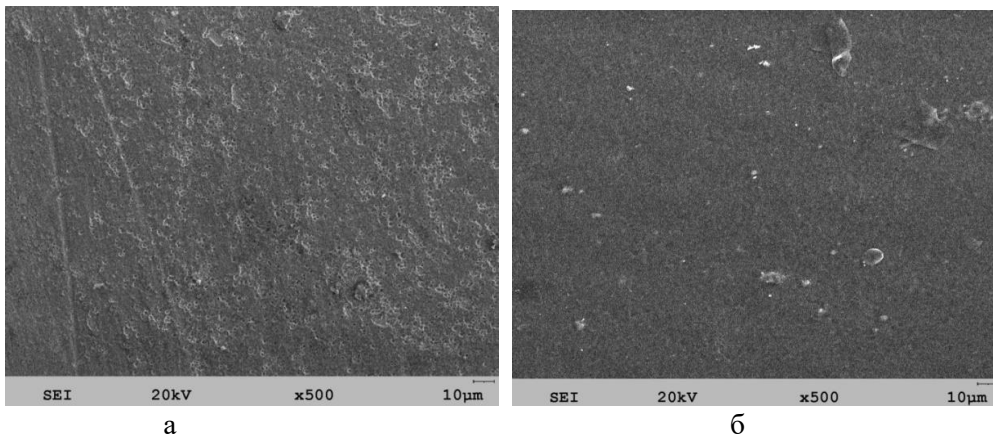


Рис. 5. Фотографії поверхонь металу (а) та кубічного нітриду бору (*PcBN*) (б) після очищення іонами молібдену

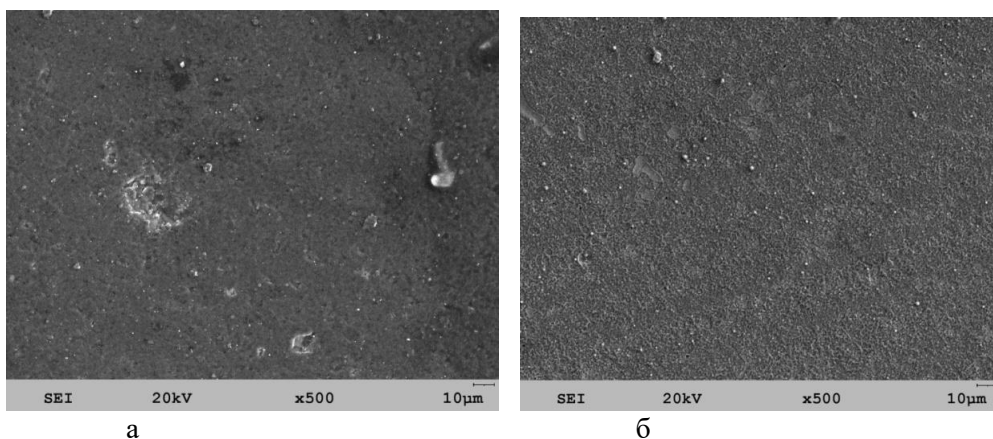
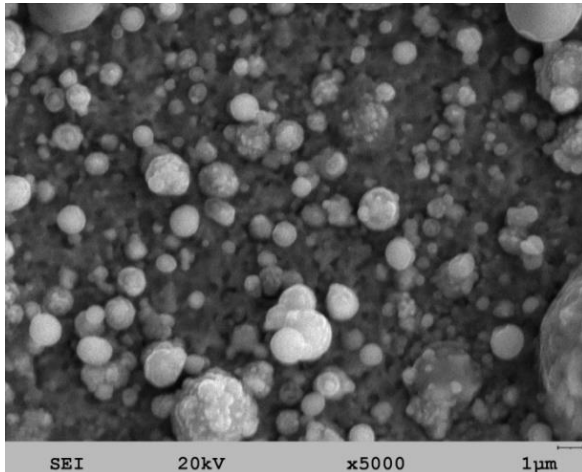
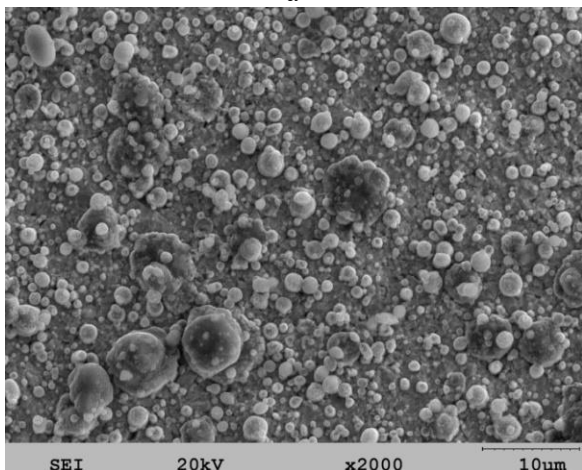


Рис. 6. Фотографії поверхонь металу (а) та кубічного нітриду бору (*PcBN*) (б) після очищення іонами хрому

Застосування для очищення та активації поверхні підкладок іонів хрому (атомна маса 51,996 а.о.м) призводить до розпорошення поверхневого шару підкладки з металу, а в разі очищення підкладки з *PcBN* – до формування тонкого шару вакуумно-дугового покриття з хрому.



а



б

Рис. 7. Фотографії поверхонь металу (а) та кубічного нітриду бору (*PcBN*) (б) після очищення іонами сплаву *TiAlYCr*

Використання для очищення та активації поверхні підкладок іонів сплаву *TiAlYCr* призводить до появи великої кількості крапель різного розміру (від 1 до 10 мкм) на поверхні, що зі свого боку значно погіршують якість підготовки поверхні. Поява такої значної кількості крапель на поверхні пов'язана з наявністю у сплаві алюмінію з температурою плавлення 993,5 К. Отже, доведено, що застосування сплавів для очищення поверхонь підкладок не є доцільним і очищення підкладок перед нанесенням вакуумно-дугових покриттів на основі таких сплавів необхідно

виконувати іонами чистих металів, наприклад іонами молібдену або хрому.

### Висновки

Візуально підтверджено, що підготовку підкладок із металів найбільш доцільно проводити іонами газів, або хрому, або молібдену. Використання багатокомпонентних катодів, особливо з легкоплавким алюмінієм, як джерела для очищення не рекомендується, тому що відбувається осадження покриттів та крапель, а не розпорошення поверхні. Очищати поверхню діелектричних матеріалів, зокрема *PcBN*, рекомендується тільки іонами газів, що приводить в подальшому до найкращої адгезії.

### Література

1. Stress State in the Cutting Zone of a PcBN Tool with a TiAlSiYN Coating / A.S. Manokhin et al. *Journal of Superhard Materials*. 2022. Vol. 44. № 5. P. 368–376.
2. Адсорбційна здатність поверхні металевих тонких плівок після бомбардування йонами  $Ar^+$  низьких енергій / М. О. Васильєв та ін. *Металлофізика та новітні технології*. 2020. Вип. 42. № 5. С. 621–630.
3. Вплив попередньої підготовки поверхні підкладок на морфологію двокомпонентних покриттів, отриманих в інверсійній магнетронній розпорошувальній системі / Д.В. Слюсар та ін. *Аерокосмічна техніка та технології*. 2019. № 1. С. 79–85.

### References

1. Manokhin, A.S., Klymenko, S.A., Stolboviy, V.O., Kolodiy, I.V., Kopieikina, M.Yu., Klymenko, S.An., Kamchatna-Stepanova, K.V., Serdyuk, I.V. (2022). Stress State in the Cutting Zone of a PcBN Tool with a TiAlSiYN Coating. *Journal of Superhard Materials*, vol. 44, no. 5, pp. 368–376.
2. Vasylyev, M.O., Sidorenko, S.I., Kruhlov, I.O., Trubchaninova, D.I. (2020). Adsorption Capacity of Metallic Thin Films after Bombarding by Low-Energy  $Ar^+$  Ions. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 42, no. 5, pp. 621–630.
3. Sliusar, D.V., Kolesnyk, V.P., Chuhai, O.M., Lytovchenko, L.V., Yshchenko, Ye.I., Oleinyk, S.V. (2019). Influence of the Preliminary Preparation of the Substrates' Surface on the Morphology of Two-Component Coatings Received in the Inverse Magnetron Sprayer System. *Aerospace technic and technology*, no. 1, pp. 79–85.

Сердюк Ірина Віталіївна<sup>1</sup>, к.т.н., с.н.с,  
 ННЦ ХФТІ НАН України, вул. Академічна, 1,  
 Харків, 61108, Україна, тел. +38 095 603-10-69,  
[iraserduk@kipt.kharkov.ua](mailto:iraserduk@kipt.kharkov.ua).

Столбовий В'ячеслав Олександрович<sup>2</sup>, д.т.н., професор кафедри технології металів та матеріалознавства імені О.М. Петриченка, тел. +38 063 573-18-96, [stolbovoy@kipt.kharkov.ua](mailto:stolbovoy@kipt.kharkov.ua).

Андрєєв Анатолій Опанасович<sup>1</sup>, д.т.н., с.н.с., пров.н.с. тел. +38 066 023-84-41, [aandreev@kipt.kharkov.ua](mailto:aandreev@kipt.kharkov.ua).

Кривошопка Руслан Васильович<sup>1</sup>, аспірант, тел. +38 093 201-90-35, [kryvoshapkarv@gmail.com](mailto:kryvoshapkarv@gmail.com).

<sup>1</sup>ІННЦ ХФТІ НАН України, вул. Академічна, 1, Харків, 61108, Україна.

<sup>2</sup>Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 25, вул. Ярослава Мудрого, м. Харків, 61002, Україна.

### Substrate surface processing in gas vacuum arc discharge

**Abstract. Problem.** Preparation of the surface before the deposition of vacuum arc coatings is of great importance, as it affects not only the adhesive properties of the obtained coatings, but also the physical and mechanical properties of the substrate surface layer. The processes of ions interaction with the substrate surface during its ionic cleaning, before the deposition of coatings, have been relatively little studied and are almost not described in the literature. **Goal.** In this work, some of their features are considered in relation to the surface preparation of materials before the deposition of vacuum arc coatings. **Methodology.** The nature of the plasma interaction with the substrate material is determined by the ions energy and their flow density, other things being equal. The energy of the ions treating the substrate consists of their initial energy and the energy acquired in the Debye layer adjacent to the substrate when a negative potential is applied to it. The value of the potential at which the processes of condensation or sputtering are balanced is determined mainly

by the nature of the vaporized material. When the value of the substrate potential increases, the deposited particles and its material are sputtered. At the same time, atoms on the substrate that are weakly connected to it, various impurities are removed, substrate temperature increases, especially in its surface layers. **Results.** The work investigates the influence of various metals and gases used to clean the surface of substrates made of cubic boron nitride PcBN and steels on the surface morphology. It was established that the use of gases (argon, nitrogen) for cleaning the surface of dielectric materials, in particular PcBN, showed the best results, which subsequently leads to an increase in the adhesion of the vacuum arc coating to the substrate. **Practical value.** The obtained results of investigation are of great practical importance. They can be used for the increasing of tool life and productivity of mechanical engineering.

**Key words:** vacuum arc discharge, surface, sputtering, substrate, morphology.

Serdiuk Iryna Vitaliivna<sup>1</sup>, PhD, Senior Researcher NSC KIPT of the NAS of Ukraine,

[iraserduk@kipt.kharkov.ua](mailto:iraserduk@kipt.kharkov.ua), +38 095 603-10-69,

Stolbovyi Viacheslav Oleksandrovich<sup>2</sup>, Doctor of Science, Professor of Department of Metal Technology and Materials Science named after O.M. Petrichenko, [stolbovoy@kipt.kharkov.ua](mailto:stolbovoy@kipt.kharkov.ua), +38 063 573-18-96,

Andreev Anatolij Opanasovich, Doctor of Science, Leading Researcher,

[aandreev@kipt.kharkov.ua](mailto:aandreev@kipt.kharkov.ua), тел. +38 066 023-84-41,

Kryvoshapka Ruslan Vasilevich, PhD Student, [kryvoshapkarv@gmail.com](mailto:kryvoshapkarv@gmail.com), +38 093 201-90-35.

<sup>1</sup> NSC KIPT of the NAS of Ukraine.

<sup>2</sup>Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.