

УДК 621.793.74.02

doi: 10.32620/akt.2019.1.10

Д. В. СЛЮСАР, В. П. КОЛЕСНИК, О. М. ЧУГАЙ, Л. В. ЛИТОВЧЕНКО,
Є. І. ІЩЕНКО, С. В. ОЛІЙНИК

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», Україна

ВПЛИВ ПОПЕРЕДНЬОЇ ПІДГОТОВКИ ПОВЕРХНІ ПІДКЛАДОК НА МОРФОЛОГІЮ ДВОКОМПОНЕНТНИХ ПОКРИТТІВ, ОТРИМАНИХ В ІНВЕРСНІЙ МАГНЕТРОННІЙ РОЗПОРОШУВАЛЬНІЙ СИСТЕМІ

Досліджено фактори, що впливають на ефективність іонного очищення підкладок з бронзи БрАЖ9-4 і нержавіючої сталі 12Х18Н9Т при використанні дослідно-промислової установки «Вихрь-К». Установка оснащена інверсною магнетронною розпорошувальною системою з газовим анодом, секціонованими катодними вузлами та забезпечує створення радіальних потоків плазми. За допомогою растрового електронного мікроскопу «РЕМ 10б» досліджено склад та морфологію поверхні підкладок та сформованих на них покриттів типу WC. Встановлено, що на ефективність проведення іонного очищення поверхні підкладок впливає величина потенціалу, під яким знаходяться катоди-мішені по відношенню до корпусу установки. За умов порівняно високого позитивного потенціалу очищення не відбувається взагалі. В той же час при низькому потенціалі спостерігається розпорошення матеріалу катодів-мішеней. Тому виникла потреба експериментально встановити режим іонного очищення підкладок з бронзи БрАЖ9-4 і нержавіючої сталі 12Х18Н9Т при використанні інверсної магнетронної розпорошувальної системи з газовим анодом, секціонованими катодними вузлами та радіальними потоками плазми, що забезпечить якісну очистку поверхонь підкладок без розпорошення катодів. Режим визначається величиною електроопору резисторів, які з'єднанні з катодними вузлами. Досліджено морфологію та склад поверхні різних ділянок підкладок з бронзи та сталі, як після їх іонного очищення, так і з нанесеним покриттям типу карбід вольфраму. Встановлено, що на відміну від покриттів, сформованих за допомогою вказаної системи з осьовими потоками плазми, при використанні радіальних потоків відсутня залежність морфології поверхні покриттів від віддаленості досліджуваної ділянки покриття відносно краю підкладки. Можливо, це пов'язано з характеристиками електричного поля та потоків плазми поблизу як катодів-мішеней, так і металевих підкладок. Отже при формуванні покриттів типу WC на металевих підкладках за допомогою магнетронних розпорошувальних систем існують певні переваги використання радіальних потоків плазми порівняно з осьовими потоками.

Ключові слова: двокомпонентні покриття; карбід вольфраму; іонне очищення; морфологія поверхні.

Вступ

Загальновідомо, що іонне очищення поверхні підкладок перед формуванням покриттів за допомогою магнетронних розпорошувальних систем (МРС) є необхідною умовою забезпечення високої адгезії покриттів [1]. При цьому суттєву роль відіграє морфологія поверхні підкладки після очищення. Раніше [2] була досліджена морфологія поверхні металевих підкладок та двокомпонентних покриттів, сформованих на них за допомогою інверсної МРС з газовим анодом, секціонованими катодними вузлами та осьовими потоками плазми [3]. У якості модельного було досліджено покриття із карбід вольфраму, яке привертає до себе увагу як засіб підвищення зносостійкості та корозійної стійкості широкого кола виробів [4, 5]. Встановлено, що за вказаних умов формування покриттів на

морфологію їх поверхні суттєво впливає шорсткість підкладок, яка виникає в процесі їх іонного очищення. З іншого боку, значний інтерес становить одержання багатоконпонентних покриттів за допомогою тієї ж МРС але з радіальними потоками плазми [6]. У зв'язку з цим виникли наступні задачі дослідження покриттів, сформованих за допомогою інверсної МРС з газовим анодом, секціонованими катодними вузлами та радіальними потоками плазми у порівнянні з випадком осьових потоків плазми:

– встановлення факторів, що впливають на шорсткість та якість іонного очищення поверхні металевих підкладок;

– дослідження морфології поверхні двокомпонентних покриттів, сформованих на підкладках за допомогою розпорошувальної інверсної МРС.

1. Методика експерименту

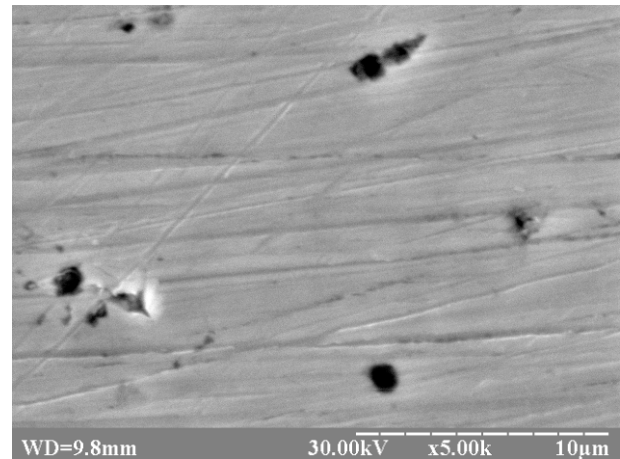
Покриття типу WC формували за допомогою установки «Вихор-К», оснащеною інверсною МРС з газовим анодом, секціонованими катодними вузлами та осьовими потоками плазми, одночасно на серію підкладок розмірами $30 \times 30 \times 10$ мм. Підкладки виготовили з бронзи БрАЖ9-4 і нержавіючої сталі 12Х18Н9Т однакової шорсткості. Далі ці матеріали іменуються як «бронза» та «сталь». Покриття були сформовані шляхом розпорощення 24 катодів-мішеней, виготовлених з вольфраму марки ВА (чистота 99,95%) і 12 катодів-мішеней із графіту спектрально-чистого марки ОСЧ 7-3. Товщина покриттів становила 8...9 мкм. Морфологію їх поверхні досліджували за допомогою растрового електронного мікроскопа РЕМ 106.

2. Результати та їх обговорення

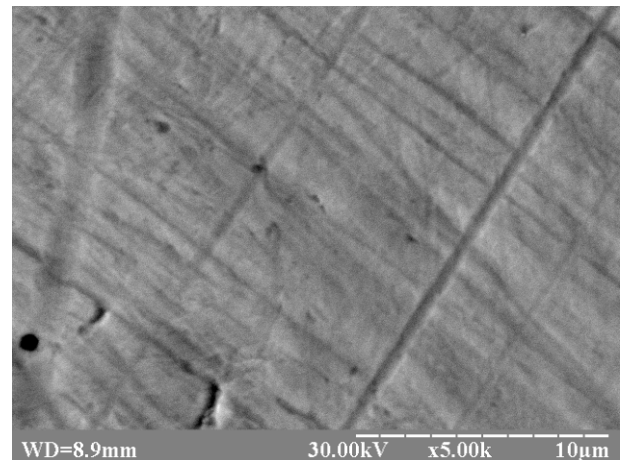
Встановлено, що покриття типу WC, сформовані за допомогою інверсної МРС з газовим анодом, секціонованими катодними вузлами та радіальними потоками плазми мають порівняно меншу адгезію до підкладок з бронзи та сталі ніж у випадку використання розпорощувальної системи з осьовими потоками плазми. Під час іонного очищення в цій системі з використанням радіальних потоків плазми так само, як і в системі з осьовими потоками, оброблювані деталі знаходяться під нульовим потенціалом відносно корпусу камери, що забезпечує прискорення іонів плазмоутворюючого газу (Ar). Було зроблено припущення, що зниження адгезії обумовлено тим, що під час іонного очищення між оброблюваними підкладками та зоною генерації іонів вказаного газу розташовані катодні вузли, які знаходяться під високим позитивним потенціалом відносно корпусу камери. Зазначимо, що цей потенціал регулюється за допомогою змінних баластних резисторів з метою запобігання розпорощення матеріалу катодів-мішеней під час іонного очищення. Разом з тим електричне поле поблизу катодних вузлів унеможливило попадання іонів плазмоутворюючого газу на підкладки. Тому їх іонне очищення не відбувається. Це припущення підтвердили дослідження мікрофотографій підкладок до та після іонного очищення (рис. 1). Можна бачити, що стан поверхні підкладки після проведення операції іонного очищення не змінився. Зокрема не виявлено слідів розпорощення поверхні підкладки іонами.

Отже треба було змінити режим іонної очистки підкладок таким чином, щоб електричне поле поблизу катодних вузлів не заважало потраплянню

іонів плазмоутворюючого газу на поверхню підкладок. Для цього електроопір змінних баластних резисторів, за допомогою яких, як зазначалось, регулюється потенціал на катодах, було встановлено нульовим, тобто $R_c=0$ Ом, $R_w=0$ Ом. Але це призвело не тільки до більш інтенсивного розпорощення підкладок під час іонного очищення, але й до інтенсивного розпорощення катодів-мішеней.



а



б

Рис. 1. Мікрофотографії ділянок сталеві підкладки до (а) та після (б) іонного очищення (режим $R_c=4095$ Ом, $R_w=4095$ Ом)

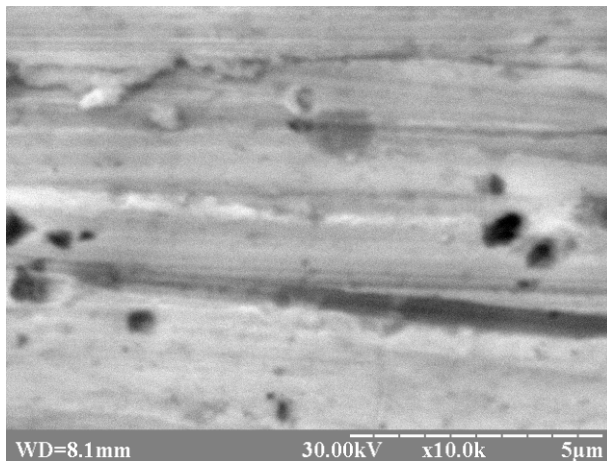
В наслідок цього крім іонного очищення поверхні підкладок відбувалось нанесення на них покриття типу WC. Це підтверджується результатами аналізу складу поверхні підкладок з різних матеріалів після іонного очищення (табл. 1). Так, на поверхні обох зразків виявили в приблизно однаковій концентрації вольфрам, який, вочевидь, з'явився в результаті розпорощення вольфрамових катодів-мішеней.

Таблиця 1

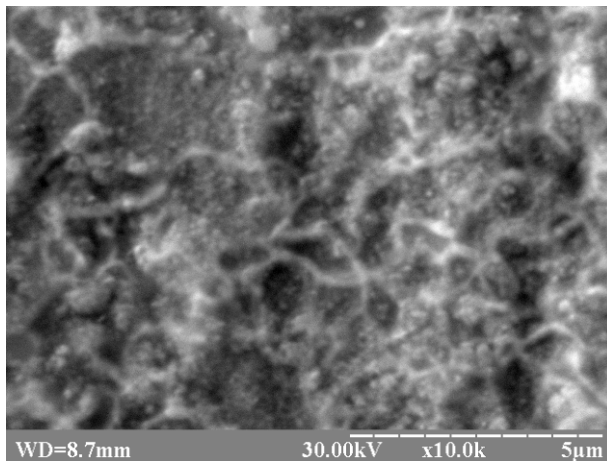
Склад поверхні зразків підкладок після проведення іонного очищення при $R_c=4095 \text{ Ом}$, $R_w=4095 \text{ Ом}$

Елемент	Зразок із сталі	Зразок із бронзи
Cu	-	86,65 %
Al	-	7,22 %
Fe	77,70 %	3,00 %
W	1,19 %	1,76 %
Pb	-	0,89 %
Si	0,64 %	0,47 %
Cr	17,75 %	-
Ni	1,49 %	-
Mn	1,22 %	-

Мікрофотографії поверхні підкладок до та після іонного очищення показано на рис. 2 та 3.

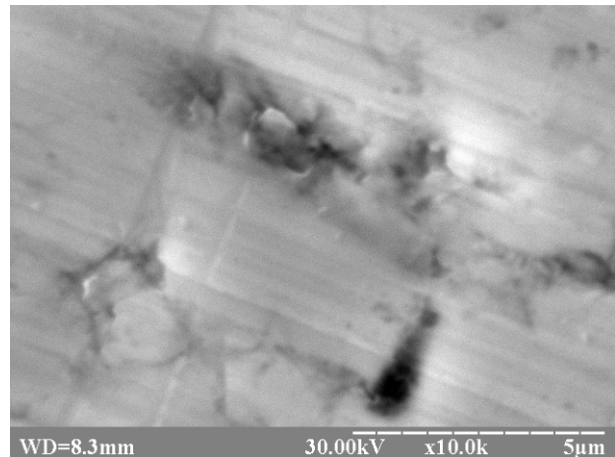


а

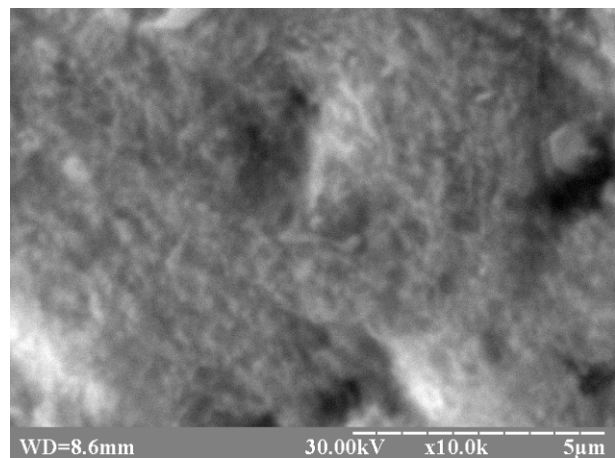


б

Рис. 2. Мікрофотографії поверхні бронзової підкладки до (а) та після (б) іонної очистки потоками плазми (режим $R_c=0 \text{ Ом}$, $R_w=0 \text{ Ом}$)



а



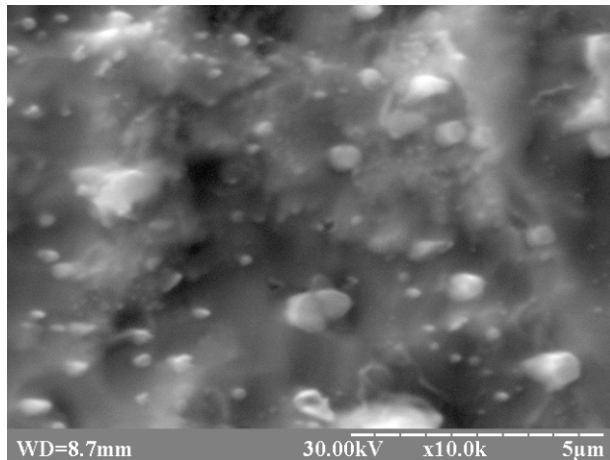
б

Рис. 3. Мікрофотографії поверхні сталевій підкладки до (а) та після (б) іонної очистки (режим $R_c=0 \text{ Ом}$, $R_w=0 \text{ Ом}$)

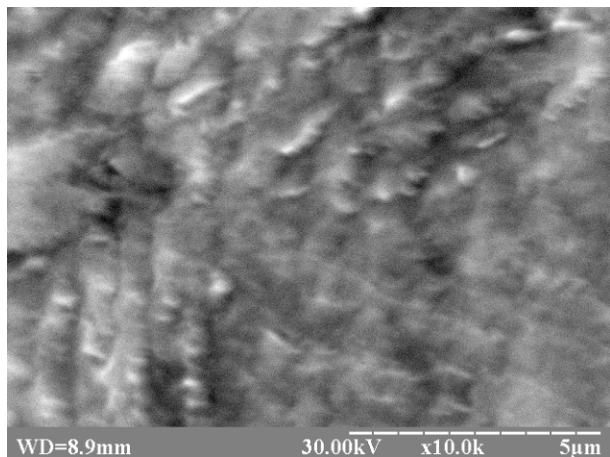
Порівнюючи частини рисунку 2, можна дійти висновку про існування на поверхні покриття із карбиду вольфраму, що сформувалося в умовах її інтенсивного іонного бомбардування. Важливо зауважити, що морфологія такого ж покриття, але сформованого на сталевій підкладці має зовсім інший вигляд (див. рис. 3).

На підставі проведених досліджень було зроблено висновок, що для забезпечення необхідної якості іонного очищення підкладок за умов використання інверсної МРС з радіальними потоками плазми треба зменшити швидкість розпоршення катодів-мішеней. Водночас необхідно залишити на них достатній потенціал, щоб створене поблизу них електричне поле не перешкоджало попаданню іонів із зони генерації на поверхню підкладок. Експериментально встановлено відповідний режим іонного очищення. При такому режимі опір баластних резисторів становив $R_c=2200 \text{ Ом}$ та

$R_w=1500$ Ом. Були отримані та досліджені зразки підкладок із бронзи та сталі після проведення іонного очищення (рисунок 4).



а



б

Рис. 4 Мікрофотографії ділянок бронзової (а) та сталеві (б) підкладок після іонної очистки при використанні радіальних потоків плазми (режим $R_c=2200$ Ом, $R_w=1500$ Ом)

Можна бачити (таблиця 2), що після іонної очистки в складі поверхні підкладок повністю відсутній вольфрам. Це свідчить про те, що швидкість розпорошення підкладок при вказаному режимі очищення суттєво більша за швидкість нанесення покриття із карбіду вольфраму. Отже вказаний режим очищення підкладок перед нанесенням покриттів із карбіду вольфраму цілком прийнятний.

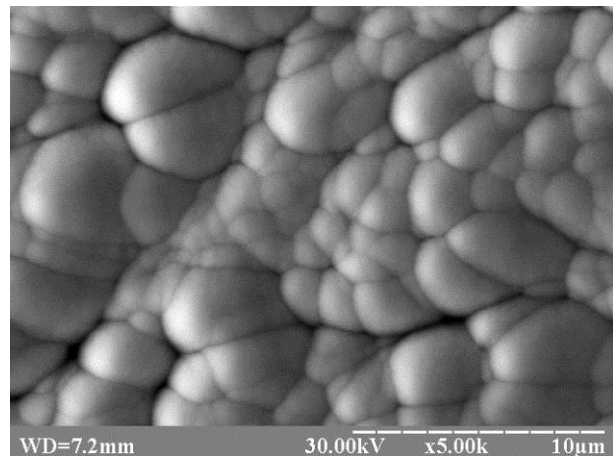
У роботі [2] було встановлено залежність морфології поверхні покриттів типу WC, що формуються за допомогою інверсної МРС з газовим анодом, секціонованими катодними вузлами та осьовими потоками плазми, від віддаленості

досліджуваної ділянки покриття від краю металеві підкладки (рисунок 5).

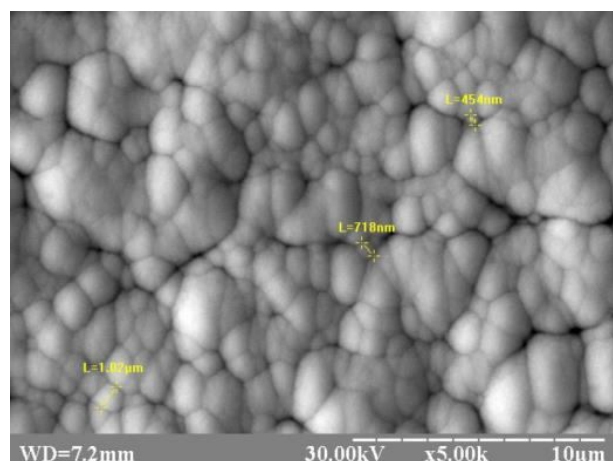
Таблиця 2

Склад поверхні зразків підкладок після проведення іонного очищення (режим $R_c=2200$ Ом, $R_w=1500$ Ом)

Елемент	Зразок із сталі	Зразок із бронзи
Cu	-	85,88 %
Al	-	11,20 %
Fe	78,68 %	2,02 %
W	-	-
Pb	0,78 %	0,90 %
Si	18,03 %	-
Cr	1,45 %	-
Ni	1,06 %	-
Mn	-	85,88 %



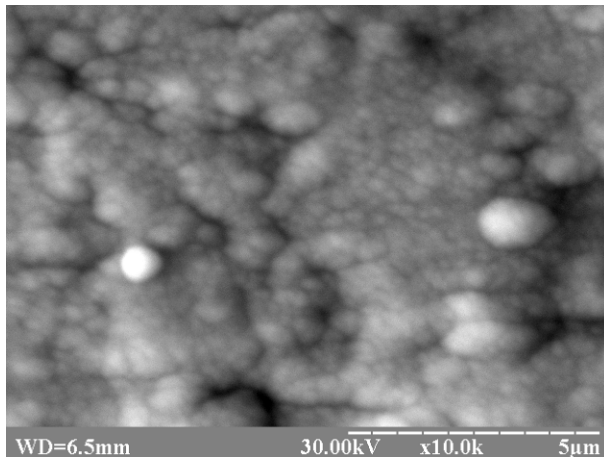
а



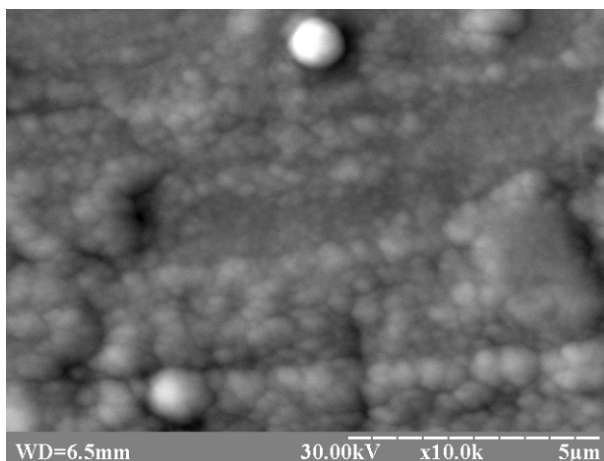
б

Рис. 5. Мікрофотографії ділянок із покриттям WC, що сформовано з використанням осьових потоків плазми на бронзовій підкладці поблизу краю (а) та в її центральній частині (б)

Але для покриттів із карбїду вольфраму, що отримані за допомогою тієї ж але з радіальними потоками плазми, такого явища не спостерігається (рисунок 6). Вочевидь, це пов'язано з характеристиками електричного поля та потоків плазми поблизу як катодів розпоршувальної системи, так і підкладок.



а



б

Рис. 6. Мікрофотографії ділянок із покриттям WC, що сформовано з використанням радіальних потоків плазми на бронзовій підкладці поблизу краю (а) та в її центральній частині (б)

Висновки

Підсумовуючи, можна стверджувати, що за допомогою інверсної магнетронної розпоршувальної системи з газовим анодом, секціонованими катодними вузлами та радіальними потоками плазми на підкладках з бронзи та нержавіючої сталі сформовані покриття типу WC. Досліджено морфологію поверхні різних ділянок як підкладок, так і покриттів. Встановлено, що на відміну від

покриттів, сформованих за допомогою тієї ж системи але з осьовими потоками плазми, одержані покриття характеризуються відсутністю залежності морфології поверхні від положення дослідженої ділянки відносно краю підкладки. Можливо це обумовлено тим, що під час проведення операції іонного очищення поверхні підкладки поблизу неї щільність іонного току розподілена більш рівномірно. Встановлення чинників, що впливають на розподіл щільності вказаного току є темою подальших досліджень. Визначено режим іонного очищення підкладок для інверсної МРС з газовим анодом, секціонованими катодними вузлами та радіальними потоками плазми, що забезпечує якісну очистку поверхні перед формуванням покриття.

Література

1. Mattox, D. M. *Handbook of physical vapour deposition (pvd) processing [Text]* / D. M. Mattox. – Westwood, New Jersey : Noyes Publications, 1998. – 917 p.
2. Слюсарь, Д. В. Влияние различных факторов на морфологию поверхности покрытий типа WC, осажденных ионно-плазменным методом [Текст] / Д. В. Слюсарь, В. П. Колесник, О. Н. Чугай и др. // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2018. – № 6(150). – С. 76-82.
3. Слюсарь, Д. В. *Метод формирования двухмерных функционально-градиентных покрытий [Текст]* : дис. канд. техн. наук : 05.03.07 ; защищена 14.11.2014 ; утв. 26.02.2015 / Д. В. Слюсарь // МОНУ, Нац. аэрокосмический ун-т им. Н. Е. Жуковского "ХАИ". – Харьков, 2014. – 163 с.
4. HeydarzadehSohi, M. *Comparative tribological study of air plasma sprayed WC-12%Co coating versus conventional hard chromium electrodeposit [Text]* / M. HeydarzadehSohi, F. Ghadami // *Tribology International*. – 2010. – No. 43. – P. 882-886.
5. *Comparative Study of Thermally Sprayed Coatings Under Different Types of Wear Conditions for Hard Chromium Replacement [Text]* / S. Houdkova, F. Zaha'lka, M. Kas'parova', L. -M. Berger // *TribolLett*. – 2011. – No. 43. – P. 139-154.
6. Колесник, В. В. *Разработка и исследование технологического процесса и оборудования для формирования многокомпонентных покрытий на лопатки ГТД [Текст]* : дис. канд. техн. наук : 05.03.07 ; защищена 15.06.2007 ; утв. 11.10.2007 / В. В. Колесник // МОНУ, Нац. аэрокосмический ун-т им. Н. Е. Жуковского "ХАИ". – Харьков, 2007. – 137 с.

References

1. Mattox, D. M. *Handbook of physical vapour deposition (pvd) processing*. Westwood, New Jersey: Noyes Publications, 1998. 917 p.

2. Slusar, D. V., Kolesnik, V. P., Chugai, O. M., Litovchenko, L. V., Stepanushkin, M. P., Abashin, S. L., Oleinik, S. V. Vlijanie razlichnyh faktorov na morfologiju poverhnosti pokrytij tipa WC, osazhdennyh ionno-plazmennym metodom [Influence of different factors on the morphology of the WC coatings' surfaces deposited by the ion-plasma method]. *Aviacijno-kosmichna tehnika i tehnologija – Aerospace technic and technology*, 2018, no. 6(150), pp. 76-82.

3. Slusar, D. V. *Metod formirovanija dvuhmernyh funkcional'no-gradientnyh pokrytij*. Dokt, Diss. [Method of formation of two-dimensional functionally graded coatings. Dokt, Diss.]. Kharkiv, 2014. 163 p.

4. HeydarzadehSohi, M., Ghadami, F. Comparative tribological study of air plasma sprayed

WC–12%Co coating versus conventional hard chromium electrodeposit. *Tribology International*, 2010, no. 43, pp. 882-886.

5. Houdkova, S., Zaha'lka, F., Kas'parova', M., Berger, L. -M. Comparative Study of Thermally Sprayed Coatings Under Different Types of Wear Conditions for Hard Chromium Replacement. *TribolLett*, 2011, no. 43, pp. 139-154.

6. Колесник, В. В. *Razrabotka i issledovanie tehnologicheskogo processa i oborudovanija dlja formirovanija mnogokomponentnyh pokrytij na lopatki GTD*. Dokt, Diss. [Development and research of the technological process and equipment for the formation of multicomponent coatings on GTE blades. Dokt, Diss.]. Kharkiv, 2007. 137 p.

Поступила в редакцию 12.01.2019, рассмотрена на редколлегии 14.02.2019

ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ ПОВЕРХНОСТИ ПОДЛОЖЕК НА МОРФОЛОГИЮ ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ В ИНВЕРСНОЙ МАГНЕТРОННОЙ РАСПЫЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЕ

Д. В. Слюсар, В. П. Колесник, О. Н. Чугай, Л. В. Литовченко, Е. И. Ищенко, С. В. Олейник

Исследованы факторы, влияющие на эффективность ионной очистки подложек из бронзы БрАЖ9-4 и нержавеющей стали 12Х18Н9Т при использовании опытно-промышленной установки «Вихрь-К». Установка оснащена инверсной магнетронной распыляющей системой с газовым анодом, секционированными катодными узлами и обеспечивает создание радиальных потоков плазмы. С помощью растрового электронного микроскопа «РЭМ 106» исследован состав и морфологию поверхности подложек и сформированных на них покрытий типа WC. Установлено, что на эффективность проведения ионной очистки поверхности подложек влияет величина потенциала, под которым находятся катоды-мишени по отношению к корпусу установки. В условиях сравнительно высокого положительного потенциала очистка не происходит вообще. В то же время при низком потенциале наблюдается распыление материала катодов-мишеней. Поэтому возникла необходимость экспериментально установить режим ионной очистки подложек из бронзы БрАЖ9-4 и нержавеющей стали 12Х18Н9Т при использовании инверсной магнетронной распыляющей системы с газовым анодом, секционированными катодными узлами и радиальными потоками плазмы, обеспечивающий качественную очистку поверхностей подложек без распыления катодов. Режим определяется величиной электросопротивления резисторов, которые соединены с катодными узлами. Исследована морфология и состав поверхности различных участков подложек из бронзы и стали как после их ионной очистки, так и с нанесённым покрытием типа карбида вольфрама. Установлено, что в отличие от покрытий, сформированных с помощью указанной системы с осевыми потоками плазмы, при использовании радиальных потоков отсутствует зависимость морфологии поверхности покрытий от удалённости исследуемого участка покрытия относительно края подложки. Возможно это связано с характеристиками электрического поля и потоков плазмы вблизи как катодов-мишеней, так и металлических подложек. Так что при формировании покрытий типа WC на металлических подложках с помощью магнетронных распыляющих систем имеются определённые преимущества использования радиальных потоков плазмы по сравнению с осевыми потоками.

Ключевые слова: двухкомпонентные покрытия; карбид вольфрама; ионная очистка; морфология поверхности.

INFLUENCE OF THE PRELIMINARY PREPARATION OF THE SUBSTRATES' SURFACE ON THE MORPHOLOGY OF TWO-COMPONENT COATINGS RECEIVED IN THE INVERSE MAGNETRONIC SPRAYER SYSTEM

D. V. Slusar, V. P. Kolesnik, O. N. Chugai, L. V. Litovchenko, E. I. Ishchenko, S. V. Oleinik

The factors affecting the efficiency of ion cleaning of CuAl9Fe4 bronze substrates and 12X18H9T stainless steel applying the «Вихрь-К» pilot plant were investigated. The unit is equipped with an inverse magnetron

sputtering system with a gas anode, partitioned by cathode assemblies and ensures the creation of radial plasma flows. It was investigated the composition and morphology of the substrates' surface and the WC-type coatings formed on them, applying «СЭМ 106» scanning electron microscope. It has been established that the effectiveness of the ionic cleaning of the substrate surface is influenced by the magnitude of the potential, under which the target cathodes are in relation to the installation case. Under conditions of relatively high positive potential, purification does not occur at all. At the same time, at a low potential, the sputtering of the material of target cathodes is observed. Therefore, it became necessary to experimentally establish the mode of ion cleaning of CuAl9Fe4 bronze substrates and 12X18H9T stainless steel using an inverse magnetron sputtering system with a gas anode, partitioned cathode nodes, and radial plasma flows, ensuring high-quality cleaning of the surfaces of the substrates without spraying the cathodes. The mode is determined by the electrical resistance of the resistors, which are connected to the cathode nodes. The morphology and surface composition of various parts of the bronze and steel substrates, both after their ionic cleaning and with the deposited coating such as tungsten carbide, was investigated. It was established that, in contrast to coatings formed using this system with axial plasma flows, when using radial flows, there is no dependence of the surface morphology on the remoteness of the investigated coating area relative to the substrate edge. This may be due to the characteristics of the electric field and plasma flows in the vicinity of both target cathodes and metal substrates. Thus, when forming coatings of the WC type on metal substrates with the help of magnetron sputtering systems, there are certain advantages of applying radial plasma flows compared to axial flows.

Keywords: two-component coatings; Wolfram Carbide; ion cleaning; surface morphology.

Слюсарь Денис Витальевич – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. каф. 402, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

Колесник Владимир Петрович – канд. техн. наук, доцент, начальник НИЧ, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

Чугай Олег Николаевич – д-р техн. наук, профессор, профессор каф. 505, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

Литовченко Леонид Васильевич – канд. техн. наук, доцент, ст. науч. сотрудник каф. 402, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

Ищенко Евгений Иванович – науч. сотр. каф. 402, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

Олейник Сергей Владимирович – канд. техн. наук, доц. каф. 505, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

Slusar Denis Vitalyevich – PhD, Senior Research Officer at the Department of 402, National Aerospace University "Kharkov Aviation Institute", Kharkov, Ukraine, e-mail: dv_slusar@yahoo.co.uk.
Orcid Author ID: 0000-0002-8314-6587.

Kolesnik Vladimir Petrovich – PhD, Associate Professor, Head of the Scientific and Research Department, National Aerospace University "Kharkov Aviation Institute", Kharkov, Ukraine, e-mail: v.kolesnik@khai.edu.
Orcid Author ID: 0000-0002-3602-1562.

Chugai Oleg Nikolaevich – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Professor at the Department of 505, National Aerospace University "Kharkov Aviation Institute", Kharkov, Ukraine, e-mail: chugai@xai.edu.ua.
Orcid Author ID: 0000-0002-2857-6592, Scopus Author ID: 6602397105.

Litovchenko Leonid Vasilevich – PhD, Associate Professor, Senior Research Officer at the Department of 402, National Aerospace University "Kharkov Aviation Institute", Kharkov, Ukraine, e-mail: papalv@i.ua.
Orcid Author ID: 0000-0001-7358-1465.

Ishchenko Evgeny Ivanovich – Research Officer at the Department of 402, National Aerospace University "Kharkov Aviation Institute", Kharkov, Ukraine, e-mail: ye.ishchenko@khai.edu.

Oleinik Sergey Vladimirovich – PhD, Associate Professor of Department of 505, National Aerospace University "Kharkov Aviation Institute", Kharkov, Ukraine, e-mail: oleynick1981@gmail.com.
Orcid Author ID: 0000-0001-6073-8531, Scopus Author ID: 8404643500.