

Д. В. СЛЮСАРЬ, В. П. КОЛЕСНИК, О. Н. ЧУГАЙ, Л. В. ЛИТОВЧЕНКО,  
Н. П. СТЕПАНУШКИН, С. Л. АБАШИН, С. В. ОЛЕЙНИК

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

## ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА МОРФОЛОГИЮ ПОВЕРХНОСТИ ПОКРЫТИЙ ТИПА WC, ОСАЖДЕННЫХ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫМ МЕТОДОМ

*Исследована морфология поверхности покрытий типа WC, сформированных ионно-плазменным методом на подложках из безоловянистой бронзы БрАЖ9-4 и нержавеющей стали 12Х18Н9Т. Изначально подложки имели одинаковую шероховатость. Покрытия были сформированы распылением множества катодов-мишеней, изготовленных из вольфрама марки ВА и графита спектрально-чистого марки ОСЧ 7-3. Толщина покрытий составила 8...9 мкм. С помощью растрового электронного микроскопа РЭМ 106 исследовали морфологию поверхности различных участков как подложек, так и сформированных на них покрытий. Установлены особенности морфологии поверхности подложек и покрытий WC, определяемые составом подложки, а также удаленностью исследуемого участка от ее края. Отмечается, что независимо от материала подложки покрытия состоят из множества зерен, размеры которых варьируются в одних и тех же пределах 0,5...3 мкм. Однако в случае покрытия, сформированного на бронзовой подложке, количественно преобладают зерна с размером 2...3 мкм. В то же время у покрытия, сформированного на стальной подложке, размеры преобладающих зерен не превышают 1 мкм. У края бронзовой подложки размер зерен варьируется в более широких пределах 0,5...5 мкм. При этом размер преобладающих зерен составляет 2...5 мкм. На основании анализа морфологии поверхности подложек до и после их ионной очистки сделан вывод, что одним из основных факторов, влияющих на морфологию покрытий из карбида вольфрама, является шероховатость поверхности подложки, возникшая при ее ионной очистке перед формированием самого покрытия. Обращено внимание на то, что особое значение имеет различие коэффициентов распыления элементов, входящих в состав подложки. Это различие коэффициентов предопределяет особенности морфологии поверхности подложки после очистки, что подтверждается литературными данными по коэффициентам распыления элементов (Fe, Cr, Ni, Ti, Cu, Si и Fe), входящих в состав применявшихся марок бронзы и стали. Кроме того, важную роль при очистке подложки и формировании покрытия играет концентрация электрического поля у края подложки.*

**Ключевые слова:** износостойкие покрытия; карбид вольфрама; ионно-плазменный метод; морфология поверхности.

### Введение

До последнего времени формирование на поверхности деталей механизмов и машин покрытий из хрома являлось незаменимым способом их защиты от износа и коррозии. Однако недостатки таких покрытий стимулировали поиск более дешевых и эффективных способов защиты поверхности деталей механизмов и машин. Одной из альтернатив хромированию поверхности является создание на ней покрытия из карбида вольфрама (WC) [1, 2]. Это покрытие, содержащее в качестве легирующих редкоземельные примеси, широко применяются при изготовлении инструментов, обладающих высокой твердостью, коррозионной стойкостью, а также износостойкостью. Накопленный опыт, в частности фирмы

Hardide Coatings, свидетельствует о перспективности применения указанных покрытий в авиационно-космической технике.

Известны несколько способов формирования покрытий WC на подложки из различных материалов. В зависимости от характеристики рабочей среды эти способы можно условно разделить на атмосферные и вакуумные. Отличительной чертой атмосферных способов является получение порошка WC с примесями, например, в результате твердофазной реакции разложения паравольфрамата аммония (ПВА) [3] или путем плазмохимического восстановительного синтеза оксидов металлов в водороде в присутствии углеводорода, что обеспечивает получение нанопорошков WC [4 – 6]. Все вышеизложенные методы требуют сравнительно высоких энерге-

тических затрат как на получение самого порошка WC, так и на его осаждение на подложку. Вакуумные методы основываются на распылении мишеней из вольфрама с добавлением карбидообразующего газа, или на распылении мишени из WC с помощью какого-либо генератора плазмы [7]. Одними из основных недостатков данных вакуумных технологий являются необходимость предварительного создания катодов из карбида вольфрама, значительные трудности, связанные с добавлением в состав покрытия редкоземельных примесей.

В Национальном аэрокосмическом университете им. Н. Е. Жуковского «ХАИ» разработана новая технологии формирования покрытий на различные подложки [8]. Уникальность этой технологии состоит в возможности формирования покрытий практически любого компонентного состава путем распыления множества катодов-мишеней изготовленных из отдельных химических элементов покрытия. Причем изменение электрических параметров процесса распыления позволяет изменять компонентный состав покрытия в течение его формирования [8]. Важно также, что разработанная в ХАИ технология требует меньших затрат, чем технологии, описанные выше.

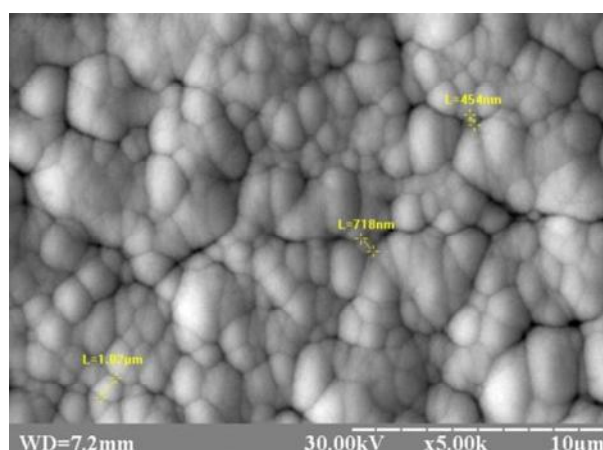
Хорошо известно, что морфология поверхности покрытий зависит от его состава и структуры. Кроме того, на морфологию поверхности оказывают существенное влияние физические поля близи поверхности подложки, которые не всегда удается в достаточной мере контролировать. Поэтому важным условием совершенствования любой технологии осаждения покрытия является исследование морфологии его поверхности. Цель нашей работы состоит в проведении такого исследования в отношении покрытий WC, сформированных по ионно-плазменной технологии на подложках из безоловянистой бронзы БрАЖ9-4 и нержавеющей стали 12Х18Н9Т.

## 1. Методика эксперимента

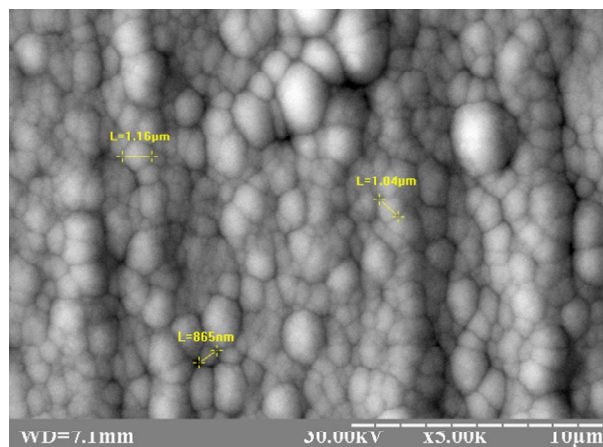
Покрытия типа WC формировали с помощью упоминавшейся выше технологии одновременно на серию подложек размерами 30×30×10 мм. Подложки обладали одинаковой шероховатостью и были изготовлены из безоловянистой бронзы БрАЖ9-4 и нержавеющей стали 12Х18Н9Т. Далее эти материалы именуются как «бронза» и «сталь». Покрытия были сформированы путём распыления множества катодов-мишеней, изготовленных из вольфрама марки ВА (чистота 99,95 %) и графита спектрально-чистого марки ОСЧ 7-3. Толщина покрытий на образцах составила 8...9 мкм. Морфологию их поверхности исследовали с помощью растрового электронного микроскопа РЭМ 106.

## 2. Результаты и их обсуждение

На рис. 1 показаны участки покрытий в центральной части подложек из бронзы и стали. Можно видеть, что независимо от материала подложки покрытия состоят из множества зерен, размеры которых варьируются в одних и тех же пределах 0,5...3 мкм. Однако в случае покрытия, сформированного на бронзовой подложке, преобладают зерна размером 2...3 мкм. В то же время у покрытия, сформированного на стальной подложке, размеры преобладающих зерен не превышают 1 мкм.



а

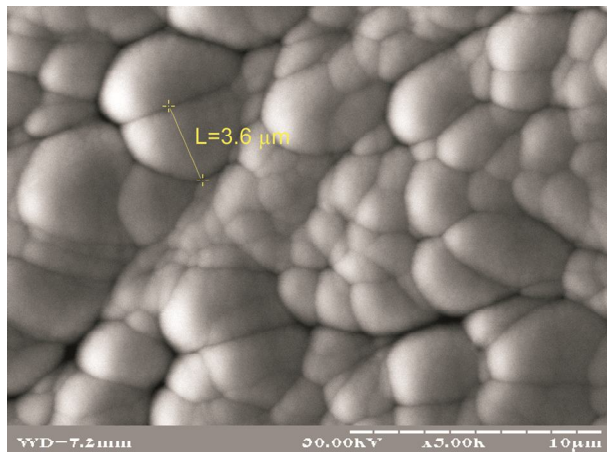


б

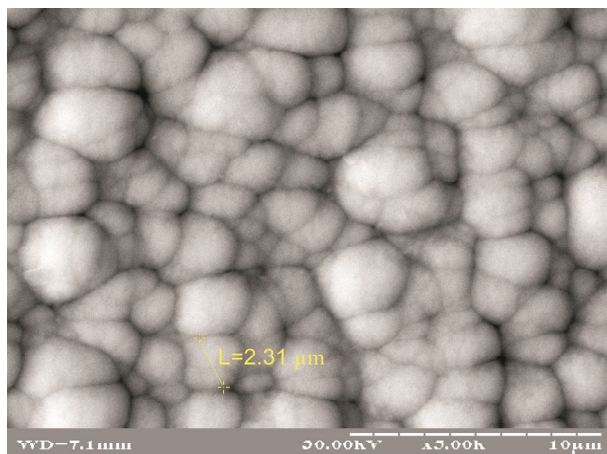
Рис. 1. Микрофотографии поверхности покрытий WC, сформированных в центральной части подложек из бронзы (а) и стали (б)

На рис. 2 показаны микрофотографии участков покрытий WC, сформировавшихся вблизи краев подложек из бронзы (а) и стали (б). Сравнивая участки покрытий, сформированных на бронзовой подложке в ее центральной части и у края (ср. рисунков 1, а и 2, а), можно видеть, что у края раз-

мер зерен варьируется в более широких пределах 0,5...5 мкм. При этом размер преобладающих зерен составляет 2...5 мкм. Отличием морфологии покрытий, сформировавшихся в центре и у края стальной подложки (ср. части рисунков 1, б и 2, б), является то, что у края преобладают зерна большего размера 1,5...3 мкм, но сохраняется весь интервал изменения размера зерен 0,5...3 мкм.



а



б

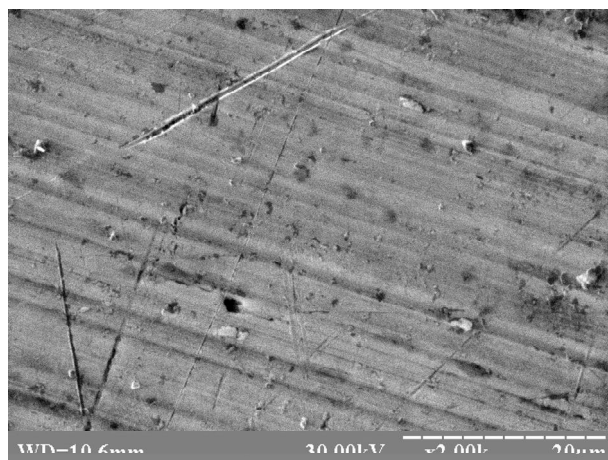
Рис. 2. Микрофотографии участков покрытий WC, сформированных вблизи края подложек из бронзы (а) и стали (б).

Таким образом, существенное влияние на морфологию покрытий WC оказывает не только состав подложки, но и удаленность исследуемого участка от ее края.

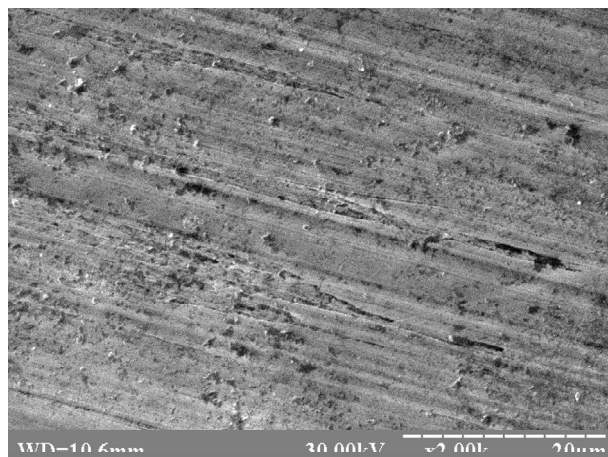
При объяснении описанных особенностей морфологии поверхности покрытий WC, на наш взгляд, важно учесть влияние технологической операции очистки подложки на последующее формирование самого покрытия. Дело в том, что процесс формирования покрытий включал операцию ионной очистки, при которой образцы распылялись ионами

плазмообразующего газа (аргона) аналогично тому, как это происходит при последующем распылении катодов-мишеней. Как оказалось, такая очистка влияет в различной степени на морфологию поверхности стальной и бронзовой подложек. При этом существенную роль играет удаленность участка подложки относительно ее края.

На рис. 3 приведены типичные микрофотографии участков поверхности бронзовой и стальной подложек, а на рисунках 4 и 5 – микрофотографии различных участков подложек из тех же материалов, но после их ионной очистки. На рис. 4 приведены микрофотографии участков, расположенных в центре подложки, а на рис. 5 – у ее края.



а

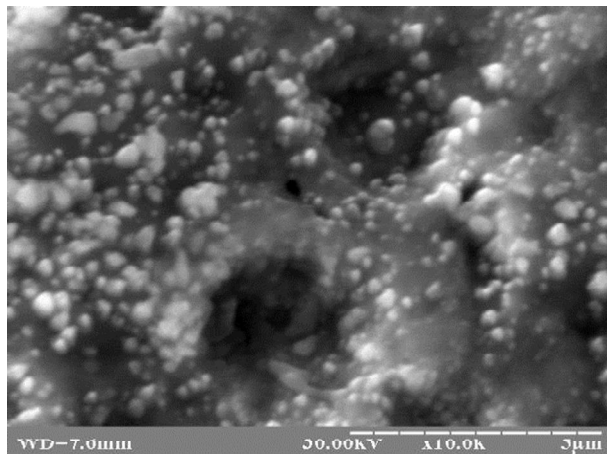


б

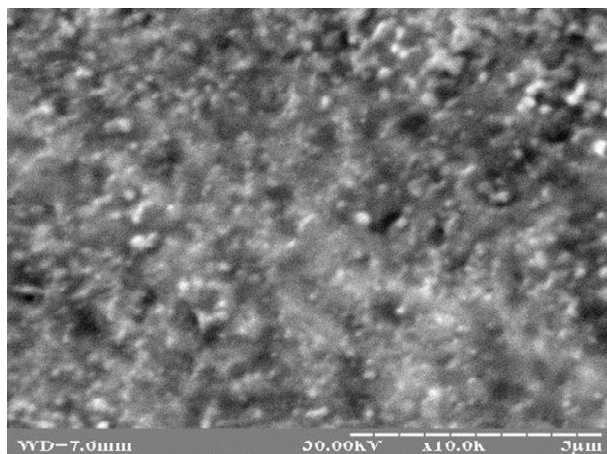
Рис. 3. Микрофотографии участков из центральной части подложек из бронзы (а) и стали (б)

Из приведенных изображений видно, что ионная очистка существенно изменила морфологию поверхности бронзовой подложки, как в ее центральной части, так и у края. Так, на участке из центральной части исчезли следы механической обра-

ботки (ср. части рисунков 3, а и 4, а), заметно возросла шероховатость и появилось множество кратеров диаметром  $\sim 2$  мкм. Кроме того, проявились зерна размером  $\sim 0,5$  мкм. Еще большие изменения претерпела морфология поверхности у края бронзовой подложки (ср. части рисунков 3, а и 5, а). Обратим внимание на образование множества вискерсов («усов») размером  $\sim 1$  мкм.



а

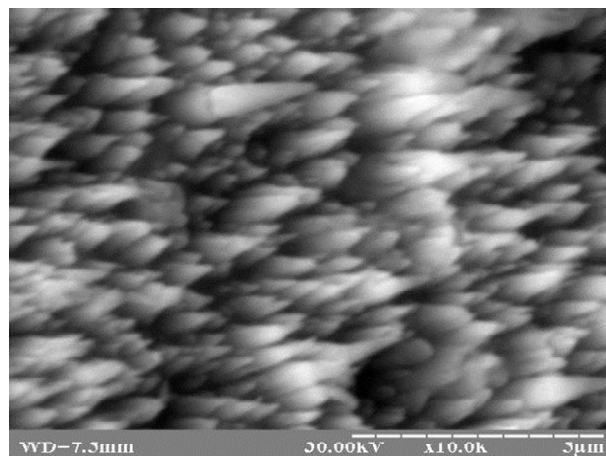


б

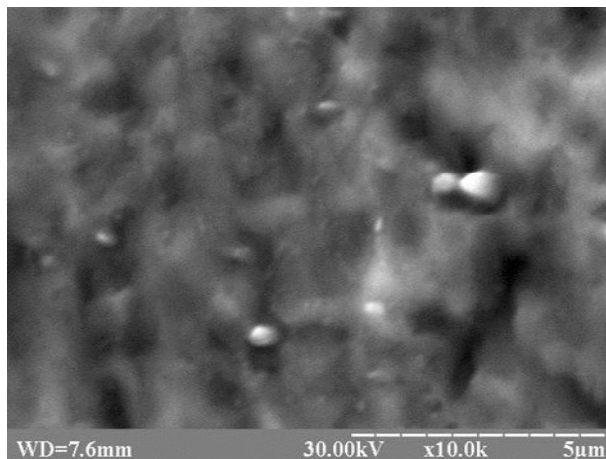
Рис. 4. Микрофотографии участков из центральной части подложек из бронзы (а) и стали (б) после проведения операции ионной очистки.

В значительно меньшей мере ионная очистка изменила морфологию различных участков поверхности стальной подложки. В частности, сравнивая части рисунков 3, б и 4, б видим, что в центральной части подложки следы механической обработки различимы и после очистки. После этой операции лишь местами проявились зёрна размером  $\sim 0,5$  мкм. Следы механической обработки обнаруживаются и вблизи края стальной подложки (ср. части рис. 3, б – 5, б). На этом участке очистка обусловила образова-

ние кратеров, хотя они менее выражены, чем в случае участков бронзовых подложек.



а



б

Рис. 5. Микрофотографии участков вблизи края бронзовой (а) и стальной (б) подложек после проведения операции ионной очистки

Как видим, влияние ионной очистки на морфологию поверхности зависит не только от материала подложки, но и от удаленности участка относительно ее края. Основной причиной этого, на наш взгляд, является различие коэффициентов распыления ускоренными ионами элементов (атомов металлов), входящих в состав бронзы и стали. С этим предположением согласуются содержащиеся в таблицах 1 и 2 данные по коэффициентам распыления элементов, входящих в исследуемые марки стали и бронзы.

Так, в случае стали (см. табл. 1) [9] коэффициенты распыления Fe, Cr и Ni мало отличаются между собой. Несмотря на то, что величина того же параметра для Ti значительно меньше, чем для других элементов из состава стали, это не играет решающей роли, ввиду малого содержания элемента в материале.

Таблица 1

Коэффициенты распыления элементов, входящих в состав стали 12Х18Н9Т, ионами Ag с энергией 1500 эВ при угле падения 0°

Элемент	Fe	Cr	Ni	Ti
Коэффициент распыления	2,15	2,05	2,35	1,1

В отличие от стали бронза характеризуется существенным (более чем в два раза) различием коэффициентов распыления входящих в нее элементов (см. табл. 2) [9]. Важно, что при этом содержания элементов близки друг другу.

Таблица 2

Коэффициенты распыления элементов, входящих в состав бронзы Бр.АЖ9-4, ионами Ag с энергией 1500 эВ при угле падения 0°

Элемент	Cu	Cu	Fe
Коэффициент распыления	3,1	0,9	2,15

В начале ионной очистки подложки ключевую роль выполняет неоднородное распределение входящих в ее состав элементов. При этом с большей скоростью с поверхности подложки удаляются слои на тех участках, на которых выше содержание легко удаляемых (с большим коэффициентом распыления) элементов. В результате формируется рельеф поверхности, естественно, изменяющий рельеф, существовавший изначально, т.е. после механической обработки подложки.

По мере развития рельефа поверхности подложки во все большей степени на удаление слоев влияют выступы (острия), вблизи которых, как известно из электродинамики, концентрируется электрическое поле. Вследствие этого происходит перераспределение ионных потоков вблизи поверхности, возрастает различие скоростей удаления слоев на разных участках подложки.

Отличием процесса ионной очистки подложки вблизи ее края по сравнению с центральной областью является более сильное электрическое поле по указанной выше роли края как концентратора поля. Более сильное поле, по всей видимости, обуславливает различия формирования рельефа (морфологии) поверхности в центре и у края подложки.

Неоднородность электрического поля и перераспределение ионных потоков вблизи поверхности подложки, оказывает свое влияние на формирование покрытия WC на очищенной подложке. Данное предположение, по нашему мнению, подтверждает приведенное на рис. 6 изображение особого участка поверхности покрытия на стальной подложке. В центре данного участка имеется сравнительно глубокая царапина, возникшая как дефект механической обработки. Концентрация электрического поля краями царапины привела к формированию вблизи нее более крупных зерен.

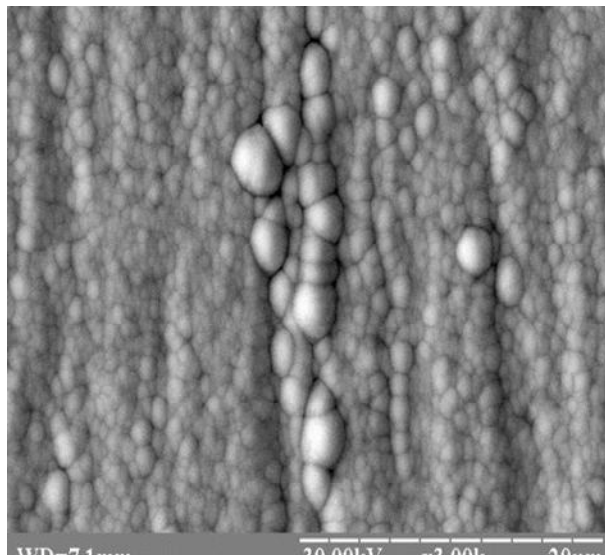


Рис. 6. Микрофотография содержащего царапину участка поверхности покрытия WC на стальной подложке

## Заключение

Ионно-плазменным методом на подложках из безоловянистой бронзы БрАЖ9-4 и нержавеющей стали 12Х18Н9Т сформированы покрытия типа WC. Исследована морфология поверхности, как подложек, так и различных участков покрытий. Установлена зависимость морфологии поверхности покрытий от состава подложки и удаленности исследуемого участка покрытия от ее края. Сделан вывод о влиянии на морфологию поверхности покрытия шероховатости подложки, возникшей при ее ионной очистке перед формированием самого покрытия.

## Литература

- 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. – № 43. – P. 882-886.
- 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. – № 43. – P. 139-154.
- Панов, В. С. Нанотехнологии в производстве твердых сплавов [Текст] / В. С. Панов // *Известия вузов. Цветная металлургия*. – 2007. – № 2. – С. 63-68.
- The corrosion behavior of WC-VC-Co hard metals in acidic media [Text] / D. S. Konadu, J. van der Merwe, J. H. Potgieter, S. Vermaak-Potgieter, C. N. Machio // *Corrosion Science*. – 2010. – V. 42, № 11. – P. 1-8.
- Лазаренко, В. В. Перспективы металлотермии в получении тугоплавких металлов и их соединений [Текст] / В. В. Лазаренко, А. П. Паришин, В. В. Шаталов // *Цветные металлы*. – 1999. – № 5. – С. 81-84.

6. Блинков, И. В. Нанодисперсные и гранулированные материалы, полученные в импульсной плазме [Текст] / И. В. Блинков, А. В. Манухин. – М. : МИСиС, 2004. – 367 с.

7. Соболев, О. В. Механизм формирования фазово-структурного состояния конденсатов, полученных ионным распылением [Текст] / О. В. Соболев // ФИИП. – 2008. – Т. 6, № 1-2. – С. 20-36.

8. Колесник, В. П. Нанесение многокомпонентных покрытий с управляемым компонентным составом по длине изделия [Текст] / В. П. Колесник, В. В. Колесник, Д. В. Слюсарь // IX Международный симпозиум по радиационной плазмодинамике : сб. науч. тр. – М. : НИЦ "Инженер", 2012. – С. 233-238.

9. Sputter Yield Values [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.npl.co.uk/science-technology/surface-and-nanoanalysis/services/sputter-yield-values>. – 29.08.2014 р.

## References

1. 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.

2. 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.

3. Panov, V. S. Nanotekhnologii v proizvodstvetverdykhsplavov [Nanotechnology in the production of hard alloys]. *IzvestiyaVuzov.TsvetnayaMetallurgiya (Proceedings of Higher Schools Nonferrous Metallurgy)*, 2007, no. 2, pp. 63-68.

4. Konadu, D. S., van der Merwe, J., Potgieter, J. H., Vermaak-Potgieter, S., Machio, C. N. The corrosion behavior of WC-VC-Co hard metals in acidic media. *CorrosionScience*, 2010, vol. 42, no. 11, pp. 1-8.

5. Lazarenko, V. V., Parshyn, A. P., Shatalov, V. V. Perspektivy metallotermyy v poluchenyutuhoplavkykh metallov y ykh soedynenyy [Prospects for metallothermia in the production of refractory metals and their compounds]. *TSvetnyye metally (Non-ferrous metals)*, 1999, no. 5, pp. 81-84.

6. Blinkov, I. V., Manukhin, A. V. *Nanodispersnyye i granulirovannyye materialy, poluchennyye v impul'snoy plazme* [Nanodispersed and granular materials obtained in pulsed plasma]. Moscow, MISIS Publ., 2004. 367 p.

7. Sobol', O. V. Mekhanizm formirovaniya fazovo-strukturnogo sostoyaniya kondensatov, poluchennykh ionnym raspyleniyem [The mechanism of formation of the phase-structural state of condensates obtained by ion sputtering] *Fizicheskaya inzheneriyapoverkhnosti (Journal of Surface Physics and Engineering)*, 2008, vol. 6, no. 1-2, pp. 20-36.

8. Kolesnik, V. P., Kolesnik, V. V., Slyusar', D. V. Naneseniye mnogokomponentnykh pokrytiy s upravlyayemym komponentnym sostavom po dline izdeliya [The deposition of multicomponent coatings with a controlled component composition along the length of the product] *IX International Symposium on Radiation Plasma Dynamics*. Moscow, Scientific and publishing center "Engineer" Publ., 2012, pp. 233-338.

9. Sputter Yield Values. Available at: <http://www.npl.co.uk/science-technology/surface-and-nanoanalysis/services/sputter-yield-values> (accessed 29.08.2014).

Поступила в редакцію 12.11.2018, рассмотрена на редколлегии 12.12.2018

## ВПЛИВ РІЗНИХ ФАКТОРІВ НА МОРФОЛОГІЮ ПОВЕРХНІ ПОКРИТТІВ ТИПУ WC, ЩО ОСАДЖЕНІ ІОННО-ПЛАЗМОВИМ МЕТОДОМ

Д. В. Слюсар, В. П. Колесник, О. М. Чугай, Л. В. Литовченко, М. П. Степанушкін,  
С. Л. Абашин, С. В. Олійник

Досліджено морфологію поверхні покриттів типу WC, сформованих іонно-плазмовим методом на підкладках з бронзи БрАЖ9-4 без вмісту олова і нержавіючої сталі 12X18H9T. Спочатку підкладки мали однукову шорсткість. Покриття були сформовані розпиленням багатьох катодів-мішеней, виготовлених з вольфраму марки ВА і графіту спектрально-чистого марки ОСЧ 7-3. Товщина покриттів була 8 ... 9 мкм. За допомогою растрового електронного мікроскопу РЕМ 106 досліджували морфологію поверхні різних ділянок як підкладок, так і сформованих на них покриттів. Встановлено особливості морфології поверхні підкладок і покриттів WC, що визначаються складом підкладки, а також віддаленістю досліджуваної ділянки від її краю. Відзначається, що незалежно від матеріалу підкладки покриття складаються з безлічі зерен, розміри яких варіюються в одних і тих же межах 0,5 ... 3 мкм. Однак у випадку покриття, сформованого на бронзовій підкладці, кількісно переважають зерна з розміром 2 ... 3 мкм. У той же час у покриття, сформованого на сталевій підкладці, розміри переважаючих зерен не перевищують 1 мкм. З краю бронзової підкладки розмір зерен варіюється в більш широких межах 0,5 ... 5 мкм. При цьому розмір зерен переважно становить 2 ... 5 мкм. На підставі аналізу морфології поверхні підкладок до і після їх іонної очистки зроблено висновок, що одним з основних чинників, що впливають на морфологію покриттів з карбиду вольфраму, є шорсткість поверхні підкладки, що утворилась під час її іонної очистки перед формуванням самого покриття. Наголошується на те, що особливе значення має відмінність коефіцієнтів розпилення елементів, що входять до складу підкладки. Ця різниця коефіцієнтів зумовлює особливості морфології поверхні підкладки після очищення, що підтверджується літературними даними по коефіцієнтам розпилення елементів (Fe, Cr, Ni, Ti, Cu, Cu і Fe), які входять до складу використаних марок бронзи і сталі. Крім того, важливу роль при очищенні підкладки та формуванні покриття грає концентрація електричного поля біля краю підкладки.

**Ключові слова:** зносостійкі покриття; карбід вольфраму; іонно-плазмовий метод; морфологія поверхні.

**INFLUENCE OF DIFFERENT FACTORS ON THE MORPHOLOGY  
OF THE WC COATINGS' SURFACES DEPOSITED BY THE ION-PLASMA METHOD**

*D. V. Slusar, V. P. Kolesnik, O. M. Chugai, L. V. Litovchenko, M. P. Stepanushkin,  
S. L. Abashin, S. V. Oleinik*

It was studied the morphology of the WC coatings' surfaces formed by the ion-plasma method on the substrates of БрАЖ9-4 tinless bronze and 12X18H9T stainless steel. Initially, the substrate had the same roughness. The coatings were formed by spraying a lot of cathodes-targets made of BA brand tungsten and ОСЧ 7-3 spectral-pure graphite. The coating thickness was 8 ... 9  $\mu\text{m}$ . The scanning electron microscope РЭМ 106 investigated the surface morphology of various areas of both the substrates and formed coatings. It is revealed the features of the morphology of the substrates and WC coatings' surfaces determined by the composition of the substrate as well as the remoteness of the investigated area from its edge. It is noted that, regardless of the substrate material, the coatings consist of a multitude of grains, the sizes of which vary in the same limits of 0.5 ... 3  $\mu\text{m}$ . However, in the case of a coating formed on a bronze substrate, grains with a size of 2 ... 3  $\mu\text{m}$  quantitatively predominate. At the same time, the coatings formed on the steel substrate, the size of the predominant grains do not exceed 1  $\mu\text{m}$ . At the edge of the bronze substrate, the grain size varies over a wider range of 0.5 ... 5  $\mu\text{m}$ . The size of the predominant grains is 2 ... 5  $\mu\text{m}$ . It was concluded that one of the main factors affecting the morphology of tungsten carbide coatings is the surface roughness of the substrate based on the analysis of the surface morphology of the substrates before and after their ionic cleaning. That roughness of the substrate arose during its ionic cleaning before forming the coating. Attention is drawn to the fact that the difference in the sputtering coefficients of the elements that form the substrate is of particular importance. This difference in coefficients predetermines the peculiarities of the surface morphology of the substrate after cleaning, which is confirmed by the literature data on the sputtering coefficients of the elements (Fe, Cr, Ni, Ti, Cu, Cu, and Fe) that are part of the applied bronze and steel grades. In addition, the concentration of the electric field at the edge of the substrate plays an important role in cleaning the substrate and coating formation.

**Keywords:** wear-resistant coatings; tungsten carbide; ion-plasma method; 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.

**Степанушкин Николай Петрович** – ст. науч. сотр. каф. 402, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

**Абашин Сергей Леонидович** – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. каф. 505, 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 Volodimir 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 Mikolaevich** – 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.

**Stepanushkin Mikolay Petrovich** – Senior Research Officer at the Department of 402, National Aerospace University "Kharkov Aviation Institute", Kharkov, Ukraine, e-mail: m.stepanushkin@khai.edu.  
ORCID Author ID: 0000-0002-7016-8445.

**Abashin Sergiy Leonidovich** – PhD, Senior Research Officer at the Department of 505, National Aerospace University "Kharkov Aviation Institute", Kharkov, Ukraine, e-mail: s.abashin@khai.edu.  
ORCID Author ID: 0000-0002-5585-9256, Scopus Author ID: 8722774400.

**Oleinik Sergiy Volodimirovich** – 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.