

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 621.793.7

Ю. Г. ЧАБАК¹, Т. В. ПАСТУХОВА², В. Г. ЕФРЕМЕНКО^{3*}, И. А. ВАКУЛЕНКО⁴,
И. А. ВОЛОСЕНКО⁵

¹Каф. «Физика», Приазовский государственный технический университет, ул. Университетская, 7, Мариуполь, Украина, 87500, тел. +38 (0629) 44 61 31, эл. почта julia.chabak25@gmail.com, ORCID 0000-0003-4913-2680

²Каф. «Физика», Приазовский государственный технический университет, ул. Университетская, 7, Мариуполь, Украина, 87500, тел. +38 (0629) 44 61 31, эл. почта kozarevskaya89@mail.ru, ORCID 0000-0002-0352-9220

^{3*}Каф. «Физика», Приазовский государственный технический университет, ул. Университетская, 7, Мариуполь, Украина, 87500, тел. +38 (0629) 44 61 31, эл. почта vgefremenko@gmail.com, ORCID 0000-0002-4537-6939

⁴Каф «Прикладная механика и материаловедение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел.+38 (056) 373 15 56, эл. почта dnuzt_texmat@ukr.net, ORCID 0000-0002-7353-1916

⁵Каф. «Физика», Приазовский государственный технический университет, ул. Университетская, 7, Мариуполь, Украина, 87500, тел. +38 (0629) 44 61 31, эл. почта ira_volosenko@mail.ru, ORCID 0000-0002-9659-0089

КОМПОЗИЦИОННОЕ ИМПУЛЬСНО-ПЛАЗМЕННОЕ ПОКРЫТИЕ «СТАЛЬ P18/ЧУГУН 230X28Г3»

Цель. В данной научной работе необходимо провести исследование композиционного покрытия, полученного импульсно-плазменной обработкой с применением катодов из высокоуглеродистых сплавов, содержащих повышенное количество карбидообразующих элементов. **Методика.** Покрытие наносили с применением электротермического аксиального плазменного ускорителя при следующих рабочих параметрах: напряжение, подаваемое на электроды – 4,0 кВ; амплитуда тока – 18 кА; расстояние между электродами ~ 50 мм. Обработку проводили по схеме: пять импульсов с электродом из стали P18 + пять импульсов с электродом из чугуна 230X28Г3. После импульсно-плазменной обработки следовала термообработка напыленных образцов: выдержка при 950 °С в течение 2 ч. с последующим охлаждением в масле. При исследовании структуры покрытия использованы оптическая (Nikon Eclipse L150) и электронная (JEOL JSM-6510) микроскопия, энергодисперсионная спектроскопия (X-Act, Oxford Instruments), измерение микротвердости (FM-300 Future-Tech Corp.). **Результаты.** Показано, что в результате импульсно-плазменной обработки с применением различных электродов формируется слоистое покрытие «сталь P18/чугун 230X28Г3» толщиной 110–130 мкм. Выполнен анализ микротвердости покрытия до и после постплазменной термической обработки; показано, что в результате закалки твердость покрытия повышается с 4 900–7 300 МПа до 10 500–13 500 МПа (слой «P18») и 12 000–16 500 МПа (слой «230X28Г3»). **Научная новизна.** Авторами проанализировано распределение легирующих элементов в пределах покрытия, выявлено наличие переходного диффузионного слоя пониженной твердости с переменным содержанием вольфрама и хрома между слоями «P18» и «230X28Г3». Установлено, что после нанесения слоя в покрытии формируется пересыщенный твердый раствор, который при постплазменной термической обработке распадается с образованием 45–70 % карбидов различной формы, что приводит к резкому повышению микротвердости покрытия после закалки. Количество карбидов в слоях пропорционально концентрации углерода и карбидообразующих элементов в катод, использованном для нанесения конкретного слоя. **Практическая значимость.** Показана возможность формирования композиционного импульсно-плазменного слоистого покрытия с переменным по сечению химическим составом и микротвердостью за счет варьирования материала катода и применения постплазменной термообработки.

Ключевые слова: импульсно-плазменная обработка; покрытие; микроструктура; карбиды; микротвердость

Введение

Нанесение защитных покрытий преследует цель повышения эксплуатационной долговечности деталей машин и инструмента, используемых в условиях трения, абразивного изнашивания, коррозии и других внешних воздействий. Получение защитных покрытий на поверхности обеспечивается различными технологиями, среди которых выделяется импульсно-плазменная обработка (ИПО) [5, 6, 15]. ИПО позволяет совмещать модифицирование металлической поверхности с нанесением покрытий различного состава и свойств [7, 12]. Для проведения ИПО используют различные устройства, генерирующие плазменные импульсы [4, 9, 13, 16]. К числу таких генераторов относится электротермический аксиальный плазменный ускоритель (ЭАПУ) [10, 11, 14]. Формирование покрытия при ИПО обеспечивается за счет переноса вещества, формирующего плазменный поток. В случае использования ЭАПУ в этом процессе участвуют электроды, стенки и среда разрядной камеры, которые при возникновении импульсного разряда парят и оплавляются, вынося атомы, ионы, микрокапли в плазменный поток, вытекающий из камеры ускорителя. Несмотря на различные влияющие факторы, химический состав и свойства покрытия в основном определяются теплофизическими свойствами (температура плавления, электропроводность, теплопроводность) материала электродов и состоянием среды в межэлектродном промежутке [17]. В работах [2, 3, 7] описаны свойства однослойных ИПО-покрытий, полученных с использованием различных катодов (графит, вольфрам, титан, сталь P18). В то же время не исследована возможность получения композиционных многослойных покрытий за счет попеременного использования различных катодов. Такие покрытия представляются перспективными с учетом возможности улучшения их свойств за счет взаимодействия легирующих компонентов слоев между собой. Строение композиционных слоев, полученных с помощью ИПО, остается неизученным, что требует проведения дополнительных исследований.

Цель

Целью работы явилось исследование композиционного покрытия, полученного импульсно-

плазменной обработкой с применением катодов из сплавов, содержащих повышенное количество карбидообразующих элементов.

Методика

Получение импульсно-плазменного покрытия осуществляли с помощью ЭАПУ, конструкция и принципы работы которого подробно описаны в работах [10, 11]. ИПО проводили при таких параметрах: напряжение зарядки накопителя энергии емкостью 1,5 мФ, подаваемое на электроды – 4,0 кВ; амплитуда тока – 18 кА; расстояние между электродами ~50 мм; расстояние от торца ЭАПУ до поверхности образца – 30 мм. В качестве катодов служили стержни диаметром 5 мм из чугуна 230X28ГЗ (2,34 % С; 27,39 % Cr; 3,13 % Mn; 1,26 % Si; 0,20 % Ti) и стали P18. Покрытие наносили на образцы размерами 10x10x25 мм из белого чугуна, содержащего 14,6 % Cr [8]. ИПО проводили по схеме: пять импульсов с электродом P18 + пять импульсов с электродом 230X28ГЗ. После ИПО следовала термическая обработка: выдержка при 950 °С (2 ч) с защитой поверхности карбюризатором с последующим охлаждением в масле.

Микроструктуру изучали с помощью оптического микроскопа Eclipse L150 (Nikon) и сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) JSM-6510 (JEOL), с использованием методик количественной металлографии [1]. Фазовый химический состав исследовали с применением энергодисперсионного спектрометра X-Act (Oxford Instruments). Микротвердость измеряли с помощью микротвердомера FM-300 (Future-Tech Corp.) при нагрузке 50 г.

Результаты

Металлографический анализ показал, что в результате ИПО на поверхности образца сформировалось покрытие толщиной 110–130 мкм (рис.1, а).

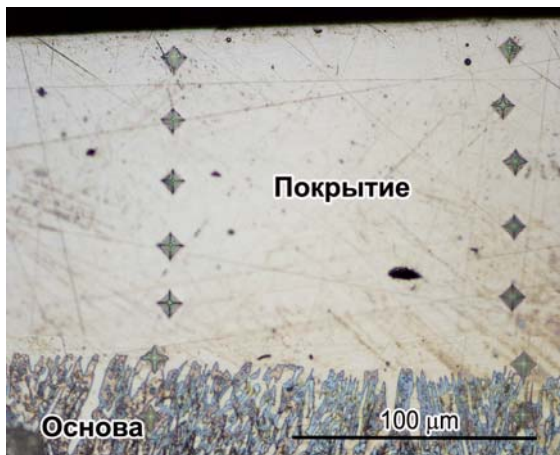
Покрытие выделяется однородностью и пониженной вытравливаемостью на фоне основы. Оно плавно сопрягается с подложкой, четко выраженная граница между ними отсутствует, что указывает на формирование металлической межатомной связи на границе раздела. В пределах покрытия наблюдаются отдельные поры.

Микротвердость покрытия в исходном (до термической обработки) состоянии находится

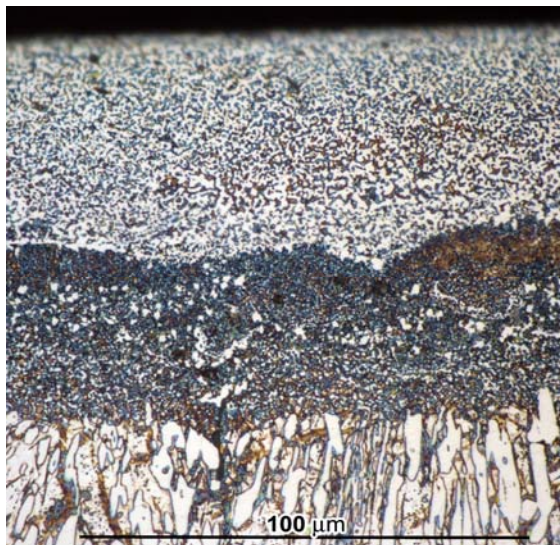
МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

примерно на одном уровне по всему сечению, варьируясь в пределах 4 900–7 300 МПа (рис. 2).

Характер микроструктуры покрытия претерпел кардинальное изменение после дополнительной термической обработки. Как следует из рис. 1, б, в пределах покрытия сформировалась четко выраженная композиционная структура, состоящая из светлого верхнего слоя толщиной 55–70 мкм и более темного нижнего слоя (45–55 мкм), прилегающего к основе.



а – а



б – б

Рис. 1. Микроструктура покрытия:
а – после нанесения; б – после дополнительной термической обработки

Fig. 1. Microstructure of the coating:
а – after deposition; б – after post heat treatment

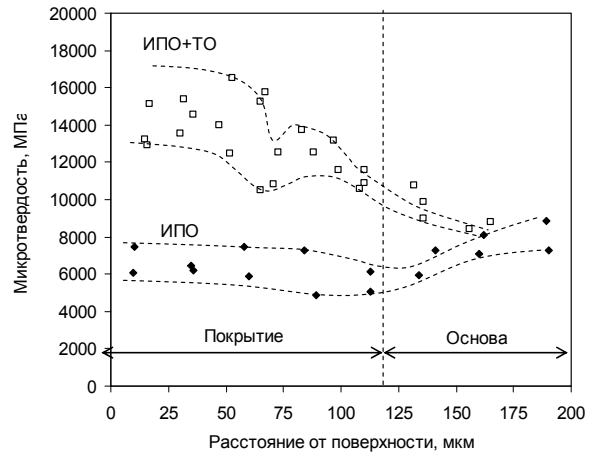


Рис. 2. Изменение микротвердости по сечению покрытия

Fig. 2. Microhardness profile in cross section of the coating

В пределах каждого из слоев структура резко не однородна, видны мелкие белые включения, хорошо различимые на фоне темной матрицы. Исследования, проведенные на сканирующем электронном микроскопе, показали, что в структуре верхнего слоя присутствуют карбиды в виде сплошной сетки толщиной 1–5 мкм по границам зерен (рис. 3, а); объемная доля этих карбидов достигает 60–70 %.

Нижний слой отличается наличием крупных включений блочного типа сечением 5–20 мкм, не связанных в сплошную сетку (рис. 3, б). Между крупными включениями, а также внутри них, находятся дисперсные включения зернистой формы средним диаметром 1–3 мкм. Общая доля включений во втором слое составляет 45–51 %. Нижний слой менее однороден; в нем находятся отдельные крупные включения, а вдоль границы с верхним слоем присутствует темная зона, практически свободная от включений.

Термическая обработка привела к резкому (примерно в 2,5 раза) повышению микротвердости покрытия относительно исходного (ИПО) состояния. Из рис. 2, б следует, что верхний слой обладает большей твердостью (12 000–16 500 МПа) по сравнению с нижним слоем (10 500–13 500 МПа). Между ними залегает зона пониженной твердости (10 000–12 300 МПа).

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

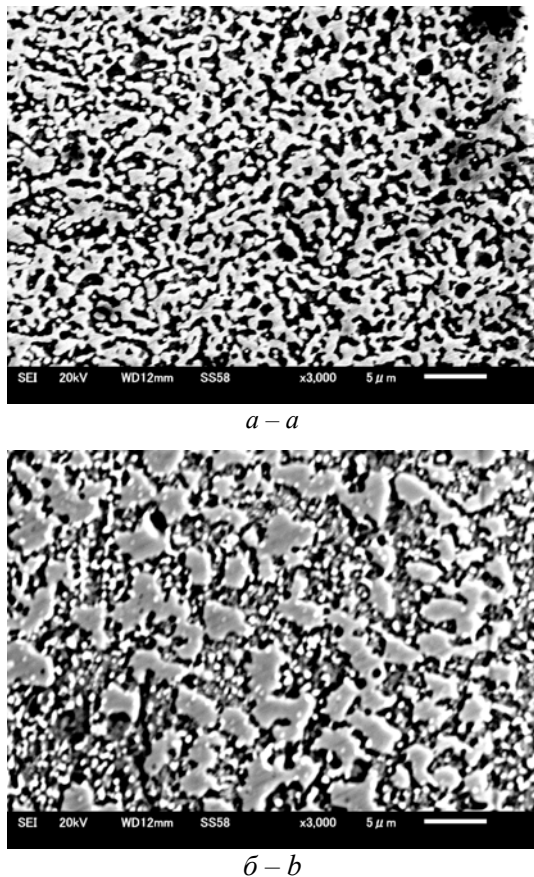


Рис. 3. СЭМ-изображения микроструктуры покрытия:

a – верхний (светлый) слой,
b – нижний (темный) слой

Fig. 3. The SEM-images of the coating microstructure:
a – upper (light) layer, *b* – lower (dark) layer

Идентификацию слоев провели с помощью энергодисперсионного анализа в режиме «mapping», результаты которого представлены на рис. 4 в виде изображений участка поверхности в рефлексах различных химических элементов. Концентрация элементов на изображениях соответствует цвету участка согласно принятой шкале, показанной слева на каждом рисунке. Распределение хрома (рис. 4, *a*) свидетельствует о том, что он сосредоточен, в основном, во внешней части покрытия, в то же время в нижнем слое хром присутствует лишь в отдельных точечных областях, по размерам соответствующих крупным включениям (см. рис. 1, *b*).

Между верхним (богатым хромом) и нижним слоями отмечается переходная диффузионная зона со средним содержанием хрома.

Вольфрам практически полностью сосредоточен в нижнем слое (рис.4, *в*). Его концентрация плавно снижается по мере продвижения от границы «покрытие/подложка» к поверхности. Это является следствием диффузии атомов вольфрама в верхний слой на глубину примерно 10–15 мкм. В верхнем слое количество железа меньше, чем в нижнем (рис.4, *з*), при этом по мере приближения к основе концентрация железа уменьшается, а вольфрама – растет. Марганец в основном сосредоточен в верхнем слое (рис. 4, *д*).

Анализ представленных результатов показывает, что импульсно-плазменное покрытие состоит из двух четко выраженных слоев. Внутренний слой, прилегающий к основе, образован при использовании катода из стали P18. Об этом свидетельствует обогащение данного слоя вольфрамом и железом при обеднении хромом и марганцем. В свою очередь, наружный слой сформирован за счет плазменного переноса вещества чугунного катода (230X28Г3), что привело к насыщению данного слоя хромом и марганцем.

Присутствие указанных карбидообразующих элементов в составе слоев обусловило формирование большого количества карбидов. Объемная доля карбидов в наружном слое выше, чем во внутреннем, что объясняется более высоким содержанием углерода и хрома в катоде 230X28Г3, использованном для нанесения этого слоя. Карбиды, сформировавшиеся во внутреннем слое, были идентифицированы ранее [7] как M_6C (крупные блочные) и M_2C (мелкие зернистые). Эти карбиды обогащены вольфрамом вследствие использования катода из стали P18. Различное количество карбидов в слоях объясняется разным уровнем их микротвердости.

Сразу после нанесения покрытие не содержало карбидов, находясь в состоянии перенасыщенного твердого раствора, возникшего в результате сверхбыстрой кристаллизации микрокапель металла. Судя по микротвердости (4 900–7 300 МПа), структура сформированного покрытия состоит из мартенсита и остаточного аустенита. Дополнительная термическая обработка вызвала распад пересыщенного раствора с выделением карбидов. Можно полагать, что обеднение аустенита по углероду, приведя к повышению мартенситной точки M_n , способст-

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

вовало мартенситному превращению при закалке. Выделение карбидов, в совокупности с формированием мартенситных элементов, обу-

словило резкое увеличение микротвердости покрытия до уровня, близкого к уровню карбидов M_7C_3 и M_6C (13 000–18 000 МПа).

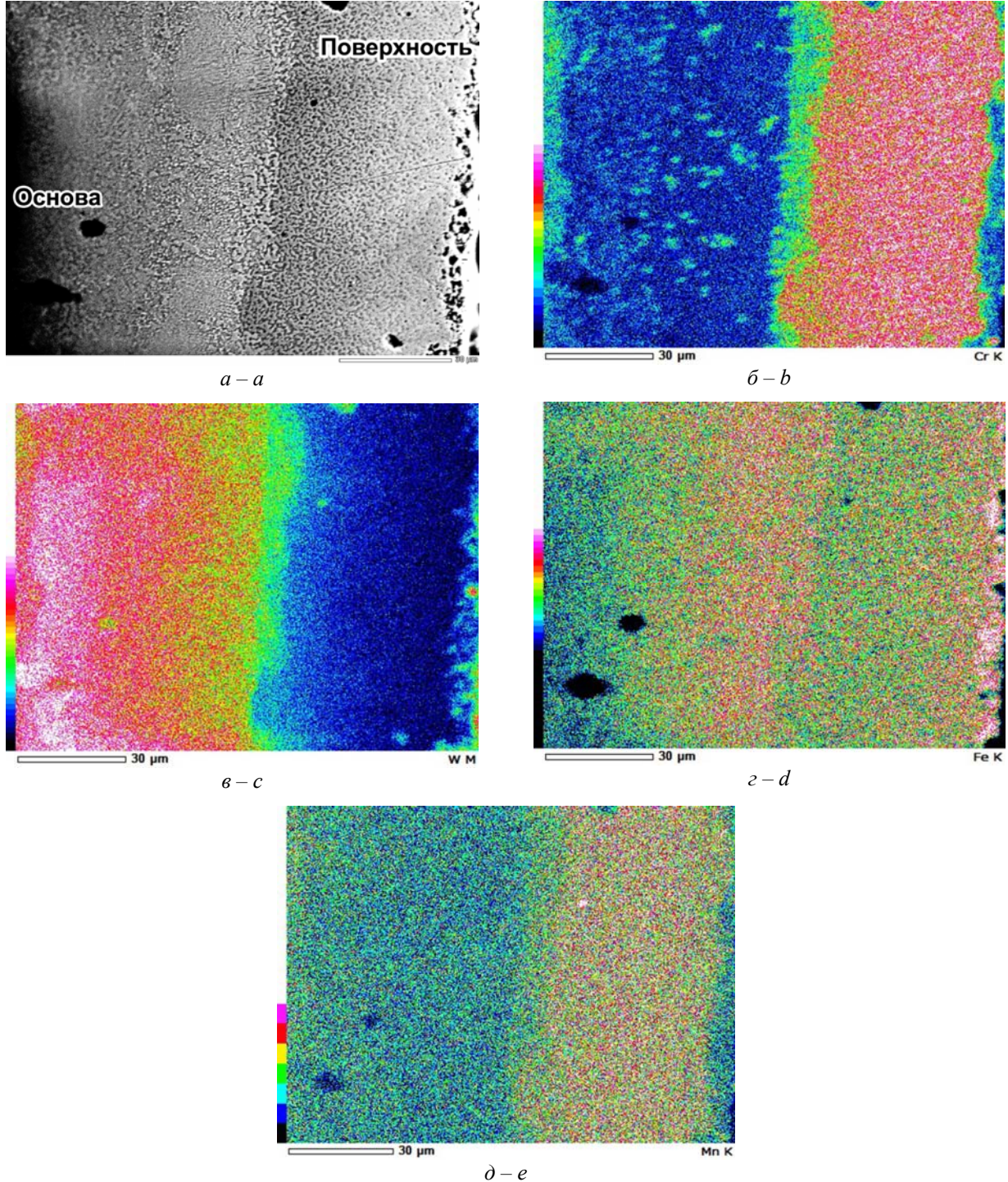


Рис. 4. Распределение химических элементов в покрытии: *a* – микроструктура, *b* – хром, *c* – вольфрам, *d* – железо, *e* – марганец

Fig. 4. The distribution of chemical elements within the coating: *a* – microstructure, *b* – chromium, *c* – tungsten, *d* – iron, *e* – manganese

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Необходимо отметить, что в ходе ИПО наблюдаемое сплавление указанных слоев сопровождается формированием переходной диффузионной зоны с переменным химическим составом по сечению. Образование этой зоны произошло при нанесении покрытия, однако определенное влияние могла оказать и встречная диффузия элементов в процессе выдержки под закалку. В связи с пониженной концентрацией хрома и вольфрама диффузионная зона содержит мало карбидов (темная зона на границе слоев (см. рис. 1, б), что уменьшает микротвердость покрытия на границе слоев. Таким образом, в результате ИПО и термической обработки на поверхности формируется покрытие с градиентом структур, отличающихся комплексом свойств. Это является эффективным препятствием возникновению трещин при эксплуатации изделий. Достижимый эффект обусловлен повышенной адгезией покрытия с основной и способностью его металла к перераспределению внутренних напряжений.

Научная новизна и практическая значимость

Показано, что в случае комбинирования материала катода в электротермическом плазменном ускорителе при ИПО возможно формирование слоистого композиционного покрытия с различной микроструктурой и микротвердостью. Установлено, что применение катодов из высокоуглеродистых сплавов, легированных вольфрамом и/или хромом, позволяет управлять процессом формирования покрытия, содержащим большое количество специальных

карбидов. Впервые исследовано распределение химических элементов (Cr, W, Mn, Fe) по сечению слоев, показана возможность формирования диффузионной зоны между слоями. Проведение высокотемпературной выдержки вызвано необходимостью распада пересыщенного твердого раствора, сформированного сверхбыстрой кристаллизацией при импульсной плазменной обработке. Выполнение (в общей сложности) десяти импульсов обеспечило получение покрытия толщиной 110–130 мкм.

Выводы

1. Использование различных катодов (сталь Р18 и чугун 230Х28ГЗ) при импульсной плазменной обработке позволяет получить композиционное покрытие с микротвердостью 10 000–16 500 МПа.

2. Термическая обработка (за счет выделения карбидов в покрытие) обеспечивает повышение его микротвердости более чем в 2–2,5 раза по сравнению с ИПО.

3. Количество карбидов в слоях покрытия пропорционально концентрации углерода и карбидообразующих элементов в катоде, использованном для нанесения конкретного слоя.

Благодарность

Авторы статьи выражают признательность профессору Kazumichi Shimizu за помощь в выполнении металлофизических исследований в лабораториях Muroan Institute of Technology (Япония).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Вакуленко, І. О. Структурний аналіз в матеріалознавстві / І. О. Вакуленко. – Дніпропетровськ : Маковецький, 2010. – 124 с.
2. Влияние материала катода и режимов импульсно-плазменной обработки на микроструктуру и микротвердость поверхности высокохромистого чугуна / Ю. Г. Чабак, В. И. Федун, Б. В. Ефременко [и др.] // Вісн. Приазов. держ. техн. ун-ту : зб. наук. пр. / Приазов. держ. техн. ун-т. – Маріуполь, 2016. – Вип. 32. – С. 72–79.
3. Влияние параметров импульсно-плазменной обработки на структурообразование и свойства стали 40Х / А. П. Чейлях, Ю. Ю. Куцомеля, В. И. Федун, М. А. Рябикина // Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. науч. тр. / Приднестр. гос. акад. стр-ва и архитектуры. – Днепропетровск, 2014. – Вып. 73. – С. 235–239.
4. Лебедев, А. Д. Импульсные ускорители плазмы высокого давления / А. Д. Лебедев, Б. А. Урюков. – Новосибирск : СО АН СССР, ин-т теплофизики, 1990. – 280 с.

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

5. Погребняк, А. Д. Модифицирование и легирование alpha-Fe с помощью воздействия высокоскоростной импульсной плазменной струи / А. Д. Погребняк, Ю. Н. Тюрин, А. П. Кобзев // Письма в журнал технической физики. – 2001. – Т. 27, вып. 15. – С. 1–8.
6. Тюрин, Ю. Н. Плазменные упрочняющие технологии / Ю. Н. Тюрин, М. Л. Жадкевич. – Київ : Наук. думка, 2008. – 215 с.
7. Фазово-структурный состав и свойства покрытия, полученного импульсно-плазменной обработкой с использованием эродирующего катода из стали P18 / Ю. Г. Чабак, В. И. Федун, К. Шимидзу [и др.] // Problems of Atomic Science and Technology. Series: «Plasma Electronics and New Acceleration Methods». – 2016. – № 4. – P. 100–106.
8. Чабак, Ю. Г. Структурные изменения в комплекснолегированном белом чугуна при дестабилизирующем нагреве / Ю. Г. Чабак, В. Г. Ефременко, Р. Р. Станишевский // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2011. – Вип. 38. – С. 229–232.
9. Deposition and characterization of Al₂O₃ coatings by multi-chamber gas-dynamic accelerator / M. Kovaleva, Yu. Tyurin, N. Vasilik [et al.] // Surface and Coatings Technology. – 2013. – Vol. 232. – P. 719–725. doi: 10.1016/j.surfcoat.2013.06.086.
10. Formation mechanism of the metallic nanostructures using pulsed axial electrothermal plasma accelerator / Yu. E. Kolyada, V. I. Fedun [et al.] // Problems of Atomic Science and Technology. Series: «Plasma Electronics and New Acceleration Methods». – 2013. – № 4 (86). – P. 297–300.
11. Kolyada, Yu. E. Pulse electrothermal plasma accelerators and its application in scientific researches / Yu. E. Kolyada, V. I. Fedun // Problems of Atomic Science and Technology. Series: «Plasma Electronics and New Acceleration Methods». – 2015. – №. 4 – P. 325–330.
12. Ozbek, Y. Y. Surface behavior of AISI 4140 modified with the pulsed-plasma technique / Y. Y. Ozbek, M. Durman // Materials and Technology. – 2015. – Vol. 49, No. 3. – P. 441–445. doi: 10.17222/mit.2013.219.
13. Phase changes in steels irradiated with intense pulsed plasma beams / B. Sartowska, J. Piekoszewski, L. Waliś [et al.] // Vacuum. – 2003. – Vol. 70. – Iss. 2–3. – P. 285–291. doi: 10.1016/S0042-207X(02)00656-5.
14. Pulse electrothermal plasma accelerators and its application in the technologies / Yu. E. Kolyada, A. A. Bizyukov, O. N. Bulanchuk, V. I. Fedun // Problems of Atomic Science and Technology. Series: «Plasma Electronics and New Acceleration Methods». – 2015. – № 4. – P. 319–324.
15. Studies and characterization of quasi-stationary compression plasma flows generated by gas-discharge and erosive plasma accelerators / V. M. Astashynski, S. I. Ananin, V. V. Askerko [et al.] // Publications of the Astronomical Observatory of Belgrade. – 2007. – No. 82. – P. 23–33.
16. The influence of the coating thickness on the phase and element composition of a Ti coating/steel system surface layer treated by a compression plasma flow / N. N. Cherenda, V. Uglov, M. G. Poluyanov [et al.] // Plasma Processes and Polymers. – 2009. – Vol. 6, No. 1. – P. 178–182. doi: 10.1002/ppap.200930507.
17. Vakulenko, I. O. Influence of chemical compounds of the forming of welding arc / I. O. Vakulenko, S. O. Plitchenko, D. V. Makarevich // Наука та прогрес транспорту. – 2014. – № 5. – P. 92–100. doi: 10.15802/stp2014/30824.

Ю. Г. ЧАБАК¹, Т. В. ПАСТУХОВА², В. Г. ЄФРЕМЕНКО^{3*}, І. О. ВАКУЛЕНКО⁴,
І. О. ВОЛОСЕНКО⁵

¹Каф. «Фізика», Приазовський державний технічний університет, вул. Університетська, 7, Маріуполь, Україна, 87500, тел. +38 (0629) 44 61 31, ел. пошта julia.chabak25@gmail.com, ORCID 0000-0003-4913-2680

²Каф. «Фізика», Приазовський державний технічний університет, вул. Університетська, 7, Маріуполь, Україна, 87500, тел. +38 (0629) 44 61 31, ел. пошта kozarevskaya89@mail.ru, ORCID 0000-0002-0352-9220

^{3*}Каф. «Фізика», Приазовський державний технічний університет, вул. Університетська, 7, Маріуполь, Україна, 87500, тел. +38 (0629) 44 61 31, ел. пошта vgefremenko@gmail.com, ORCID 0000-0002-4537-6939

⁴Каф. «Прикладна механіка та матеріалознавство», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 56, ел. пошта dnuzt_texmat@ukr.net, ORCID 0000-0002-7353-1916

⁵Каф. «Фізика», Приазовський державний технічний університет, вул. Університетська, 7, Маріуполь, Україна, 87500, тел. +38 (0629) 44 61 31, ел. пошта ira_volosenko@mail.ru, ORCID 0000-0002-9659-0089

КОМПОЗИЦІЙНЕ ІМПУЛЬСНО-ПЛАЗМОВЕ ПОКРИТТЯ «СТАЛЬ P18/ЧАВУН 230X28ГЗ»

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Мета. В даній науковій роботі необхідно провести дослідження композиційного покриття, отриманого імпульсно-плазмовою обробкою з застосуванням катодів із високовуглецевих сплавів, що містять підвищену кількість карбідоутворюючих елементів. **Методика.** Покриття наносили із застосуванням електротермічного аксіального плазмового прискорювача при наступних робочих параметрах: напруга, що подається на електроди, – 4,0 кВ; амплітуда струму – 18 кА; відстань між електродами ~ 50 мм. Обробку проводили за схемою: п'ять імпульсів із електродом зі сталі P18 + п'ять імпульсів із електродом з чавуну 230X28Г3. Після імпульсно-плазмової обробки слідувала термообробка напилених зразків: витримка при 950 °С протягом 2 год. із наступним охолодженням у маслі. При дослідженні структури покриття використані оптична (Nikon Eclipse L150) та електронна (JEOL JSM-6510) мікроскопія, енергодисперсійна спектроскопія (X-Act, Oxford Instruments), вимірювання мікротвердості (FM-300 Future-Tech Corp.). **Результати.** Показано, що в результаті імпульсно-плазмової обробки з застосуванням різних електродів формується шарувате покриття «сталі P18/чавун 230X28Г3» товщиною 110–130 мкм. Виконано аналіз мікротвердості покриття до і після постплазмової термічної обробки; показано, що в результаті гартування твердість покриття підвищується з 4 900–7 300 МПа до 10 500–13 500 МПа (шар «P18») та 12 000–16 500 МПа (шар). **Наукова новизна.** Авторами проаналізовано розподіл легуючих елементів у межах покриття, виявлено наявність перехідного дифузійного шару зниженої твердості з перемінним вмістом вольфраму і хрому між шарами «P18» та «230X28Г3». Встановлено, що після нанесення шару в покритті формується пересичений твердий розчин, який при постплазмовій термічній обробці розпадається з утворенням 45–70 % карбідів різної форми, що призводить до різкого підвищення мікротвердості покриття після гартування. Кількість карбідів у шарах пропорційна концентрації вуглецю і карбідоутворюючих елементів у катоді, який використано для нанесення конкретного шару. **Практична значимість.** Показана можливість формування композиційного імпульсно-плазмового шаруватого покриття зі змінним по перетину хімічним складом та мікротвердістю за рахунок варіювання матеріалом катода і застосування постплазмової термообробки.

Ключові слова: імпульсно-плазмова обробка; покриття; мікроструктура; карбіди; мікротвердість

Y. G. CHABAK¹, T. V. PASTUKHOVA², V. G. EFREMENKO^{3*}, I. O. VAKULENKO⁴,
I. A. VOLOSENKO⁵

¹Dep. «Physics», Pryazovskyi State Technical University, Universytetska St., 7, Mariupol, Ukraine, 87500, tel. +38 (0629) 44 61 31, e-mail julia.chabak25@gmail.com, ORCID 0000-0003-4913-2680

²Dep. «Physics», Pryazovskyi State Technical University, Universytetska St., 7, Mariupol, Ukraine, 87500, tel. +38 (0629) 44 61 31, e-mail kozarevskaya89@mail.ru, ORCID 0000-0002-0352-9220

³Dep. «Physics», Pryazovskyi State Technical University, Universytetska St., 7, Mariupol, Ukraine, 87500, tel. +38 (0629) 44 61 31, e-mail vgefremenko@gmail.com, ORCID 0000-0002-4537-6939

^{4*}Dep. «Applied Mechanics and Materials Science», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel.+38 (056) 373 15 56, e-mail dnuzt_textmat@ukr.net, ORCID 0000-0002-7353-1916

⁵Dep. «Physics», Pryazovskyi State Technical University, Universytetska St., 7, Mariupol, Ukraine, 87500, tel. +38 (0629) 44 61 31, e-mail ira_volosenko@mail.ru, ORCID 0000-0002-9659-0089

COMPOSITE IMPULSED-PLASMA COATING «STEEL T1/CAST IRON CR28MN3»

Purpose. The article is aimed to investigate the structure of the composite coating obtained by pulse-plasma treatment using cathodes of high-carbon material with higher amount of carbide-forming elements. **Methodology.** The coating was produced using electrothermal axial plasma accelerator with the following operating parameters: voltage applied to the electrodes is 4.0 kV; amplitude of the current is 18 kA; distance between electrodes of about 50 mm. The treatment was carried out according to the scheme: five pulses with electrode of steel T1 + five pulses with electrode of cast iron Cr28Mn3. The pulsed plasma treatment was followed by heat treatment as holding at 950°C for 2 hours, followed by oil cooling. Optical (Nikon Eclipse L150) and electron (JEOL JSM-6510) microscopy, energy dispersive spectroscopy (X-Act, Oxford Instruments), the microhardness measurement (FM-300 Future-Tech Corp.) were used for microstructure studying. **Findings.** It is shown that pulsed-plasma treatment using various electrodes resulted in formation of laminated coating «P18 steel/cast iron 230Cr28Mn3» of 110-130 microns thick. The analysis of micro-hardness coating before and after the post-plasma heat treatment is carried out. It is found that quenching resulted in increase of coating microhardness from

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

4 900–7 300 MPa to 10 500–13 500 MPa (layer «T1») and 12000–16500 MPa (layer «230Cr28Mn3»). **Originality.** The distribution of the alloying elements within the coating is studied. The diffusion transition layer having variable tungsten and chromium content was revealed between the layer «T1» and layer «230Cr28Mn3». It was shown that after plasma deposition an oversaturated solid solution is being formed in the coating. During post-heat treatment it decomposes with the precipitation of 45-70 % carbides of different shape resulting in sharp increase of microhardness. Carbides amount is proportional to content of carbon and carbide-forming elements in the electrode used for certain layer deposition. **Practical value.** It was shown the possibility of the formation of a composite layered pulsed-plasma coating with variable chemical composition and micro-hardness in cross-section by means of varying the cathode material and by use of post-plasma heat treatment.

Keywords: pulsed-plasma treatment; coating; microstructure; carbides; microhardness

REFERENCES

1. Vakulenko, I. O. (2010). *Strukturnyi analiz v materialoznavstvi*. Dnipropetrovsk: Makovetskiy.
2. Chabak, Yu. G., Fedun, V. I., Efremenko, B. V., Zurnadzhi, V. I., Dzherenova, A. V., & Volosenko, I. A. (2016). Cathode material and pulsed plasma treatment influence on the microstructure and microhardness of high-chromium cast iron surface. *Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, 32, 72-79.
3. Cheiliakh, A. P., Kutsomelya, Y. Y., Fedun, V. I., & Ryabikina, M. A. (2014). The influence of parameters of pulse-plasma treatment on structure and properties of steel 40Cr. *Stroitelstvo, materialovedeniye, mashinostroeniye*, 73, 235-239.
4. Lebedev, A. D., & Uryukov, B. A. (1990). *Impulsnyye uskoriteli plazmy vysokogo davleniya*. Novosibirsk: Institute of Thermophysics SB RAS.
5. Pogrebnyak, A. D., Tyurin, Y. N., & Kobzev, A. P. (2001). Modifitsirovaniye i legirovaniye alpha-Fe s pomoshchyu vozdeystviya vysokoskorostnoy impulsnoy plazmennoy strui. *Pisma v zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 27(15), 1-8.
6. Tyurin, Y. N., & Zhadkevich, M. L. (2008). *Plazmennyye uprochnyayushchiye tekhnologii*. Kyiv: Naukova dumka.
7. Chabak, Yu. G., Fedun, V. I., Shimizu, K., Efremenko, V. G., & Zurnadzhy, V. I. (2016). Phase-Structural Composition of coating obtained by pulsed plasma treatment using eroded cathode of T1 high speed steel. *Problems of Atomic Science and Technology: Plasma Electronics and New Acceleration Methods*, 4, 100-106.
8. Chabak, Yu. G., Efremenko, V. G., & Stanishevskiy, R. R. (2011). Structural changes in the complex-white cast iron at destabilizing heating. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 38, 229-232.
9. Kovaleva, M., Tyurin, Y., Vasilik, N., Kolisnichenko, O., Prozorova, M., Arsenko, M., & Danshina, E. (2013). Deposition and characterization of Al₂O₃ coatings by multi-chamber gas-dynamic accelerator. *Surface and Coatings Technology*, 232, 719-725. doi: 10.1016/j.surfcoat.2013.06.086
10. Kolyada, Y. E., Fedun, V. I., Tyutyunnikov, V. I., Savinkov, N. A., & Kapustin, A. E. (2013). Formation mechanism of the metallic nanostructures using pulsed axial electrothermal plasma accelerator. *Problems of Atomic Science and Technology: Plasma Electronics and New Acceleration Methods*, 4(86), 297-300.
11. Kolyada, Y. E., & Fedun, V. I. (2015). Pulse electrothermal plasma accelerators and its application in scientific researches. *Problems of Atomic Science and Technology: Plasma Electronics and New Acceleration Methods*, 4(98), 325-330.
12. Ozbek, Y. Y., & Durman, M. (2015). Surface behavior of AISI 4140 modified with the pulsed-plasma technique. *Materials and Technology*, 49(3), 441-445. doi: 10.17222/mit.2013.219
13. Sartowska, B., Piekoszewski, J., Walis, L., Kopcewicz, M., Werner, Z., Stanislawski, J., & Prokert, F. (2003). Phase changes in steels irradiated with intense pulsed plasma beams. *Vacuum*, 70(1-2), 285-291. doi: 10.1016/S0042-207X(02)00656-5
14. Kolyada, Y. E., Bizyukov, A. A., Bulanchuk, O. N., & Fedun, V. I. (2015). Pulse electrothermal plasma accelerators and its application in the technologies. *Problems of Atomic Science and Technology: Plasma Electronics and New Acceleration Methods*, 4, 319-324.
15. Astashynski, V. M., Ananin, S. I., Askerko, V. V., Kostyukevich, E. A., Kuzmitski, A. M., Mishchuk, A. A., & Puric, J. (2007). Studies and characterization of quasi-stationary compression plasma flows generated by gas-discharge and erosive plasma accelerators. *Publications of the Astronomical Observatory of Belgrade*, 82, 23-33.

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

16. Cherenda, N. N., Uglov, V. V., Poluyanov, M. G., Astashynski, V. M., Kuzmitski, A. M., Pogrebnjak, A. D., & Stritzker, B. (2009). The influence of the coating thickness on the phase and element composition of a Ti coating/steel system surface layer treated by a compression plasma flow. *Plasma Processes and Polymers*, 6(1), 178-182. doi: 10.1002/ppap.200930507
17. Vakulenko, I. O., Plitchenko, S. O., & Makarevich, D. V. (2014). Influence of chemical compounds of the forming of welding arc. *Science and Transport Progress*, 5(53), 92-100. doi: 10.15802/stp2014/30824

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. В. Н. Матвиенко (Украина); д.т.н., проф. В. А. Заблудовским (Украина)

Поступила в редколлегию: 02.02.2017

Принята к печати: 11.05.2017