

УДК 669.136.9

Ю.Г. Чабак¹, В.И. Зурнаджи¹, Н.П. Зайчук², Т.В. Пастухова¹, В.Г. Ефременко¹ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет»¹Луцкий национальный технический университет²**ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ИМПУЛЬСНО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ, ЛЕГИРОВАННЫХ ВОЛЬФРАМОМ И ХРОМОМ**

В статье описана микроструктура и абразивная износостойкость покрытий, полученных импульсно-плазменной обработкой при варьировании материалом катода (сталь P18 и белый чугун с 28 % Cr). Установлено, что после нанесения в покрытиях формируется пересыщенный твердый раствор с микротвердостью 500-700 HV. При дополнительной термообработке в покрытиях выделяются дисперсные карбиды, что повышает микротвердость до 1200-1600 HV, а абразивную износостойкость - на 29-77 %. Наиболее износостойкими являются слоистые покрытия, полученные чередованием катодов при обработке.

Ключевые слова: импульсно-плазменное покрытие, микроструктура, карбиды, износостойкость.

**Ю.Г. Чабак, В.И. Зурнаджи, Н.П. Зайчук, Т.В. Пастухова, В.Г. Ефременко
ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ІМПУЛЬСНО-ПЛАЗМОВИХ ПОКРИТТІВ, ЛЕГОВАНИХ
ВОЛЬФРАМОМ І ХРОМОМ**

У статті описана микроструктура і абразивна зносостійкість покриттів, отриманих імпульсно-плазмовою обробкою при варіюванні матеріалом катода (сталь P18 і білий чавун з 28% Cr). Встановлено, що після нанесення в покриттях формується пересичений твердий розчин з микротвердістю 500-700 HV. При додатковій термообробці в покриттях виділяються дисперсні карбіді, що підвищує микротвердість до 1200-1600 HV, а абразивну зносостійкість - на 29-77%. Найбільш зносостійкими є шаруваті покриття, отримані чергуванням катодів при обробці.

Ключові слова: імпульсно-плазмове покриття, микроструктура, карбіді, зносостійкість.

**Yu.G. Chabak, V.I. Zurnadghy, N.P. Zaichuk, T.V. Pastukhova, V.G. Efremenko
WEAR-RESISTANCE OF PULSED-PLASMA COATINGS ALLOYED WITH TUNGSTEN AND
CHROMIUM**

The paper presents data on the microstructure and abrasive wear resistance of coatings obtained by pulsed-plasma treatment using an electrothermal axial plasma accelerator when the cathode material is varied. The cathodes used were P18 steel and white cast iron containing 28% chromium. It is established that pulsed-plasma deposition with 10 pulses resulted in formation of the coatings of about 100 μm thickness. After deposition the coatings had a microstructure consisted of oversaturated solid solution (mixture of α-Fe and γ-Fe) having a microhardness of 500-700 HV. During pos-plasma heat treatment, the dispersed carbides are precipitated from solid solution leading to increases of coatings microhardness up to 1200-1600 HV, while their abrasive wear resistance increased by 29-77%. The highest wear resistance was attributed to layered coatings obtained by alternating cathodes in pulse-plasma processing. This could be explained by Cr/W-rich carbides formation in diffusion transition zones between the layers.

Keywords: pulse-plasma coating, microstructure, carbides, wear resistance.

Постановка проблеми. Повышение надежности и долговечности деталей машин и инструмента остается актуальной проблемой современного трибоматериаловедения. Для ее решения используются различные технологии инженерии поверхности, включая методы плазменного упрочнения поверхности. Плазменное упрочнение развивается в направлении совершенствования технологии нанесения защитных покрытий с заданными эксплуатационными свойствами.

Анализ последних исследований и публикаций. Среди плазменных технологий особое место занимает импульсно-плазменная обработка (ИПО), используемая для поверхностного упрочнения деталей машин и инструмента [1, 2]. Факторами упрочнения при ИПО являются модификация поверхности изделия и формирование защитного слоя, состоящего из компонентов электродов плазмотрона и плазмообразующей среды [3, 4]. Модифицирующее воздействие (т.е. изменение структуры и свойств материала) обеспечивается за счет скоростного нагрева поверхности и быстрого отвода тепла вглубь детали (скоростная закалка), деформационного воздействия плазменного импульса и радиационно-стимулированного диффузионного насыщения элементами, расположенными на поверхности [4, 5]. Известны различные методы генерирования плазменных импульсов, различающиеся конструкцией и принципом работы плазменных генераторов [6, 7]. В работах [8, 9] описана возможность применения электротермического аксиального плазменного ускорителя (ЭАПУ) для решения задач инженерии поверхности. Опубликованы данные [10-12] относительно использования ЭАПУ для нанесения покрытий из титана, углеродистой стали, инструментальной быстрорежущей стали, высокохромистого чугуна. В этих статьях описаны

микроструктурное состояние, фазовый химический состав и распределение микротвердости в пределах импульсно-плазменных покрытий; вместе с тем, в них отсутствуют данные относительно трибологических свойств сформированных защитных слоев, что представляет определенный научный и практический интерес.

Цель работы – исследование абразивной износостойкости импульсно-плазменных покрытий, нанесенных с помощью электротермического аксиального плазменного ускорителя.

Методика. Нанесение покрытий производили с помощью ЭАПУ, схема которого представлена на рис. 1. Ускоритель состоит из разрядной камеры в виде трубчатого разрядника РТФ-6-0,5/10У1 и электрической схемы его подключения [8, 9]. В разрядной камере, представляющей собой бумажно-бакелитовую трубу с внутренним каналом диаметром 8 мм, вставляется сменный аксиальный электрод (катод) в виде стержня диаметром 5 мм. При замыкании искрового зазора возникает сильноточный электрический разряд, за время горения которого (около 1 мс) происходит резкое повышение температуры, приводящее к испарению стенок камеры и электродов с последующей ионизацией атомов и образованием плазмы [8]. Помимо испарения, поверхность электродов оплавляется, и их материал переносится плазменным потоком в виде микрокапель, которые кристаллизуются на обрабатываемой поверхности.

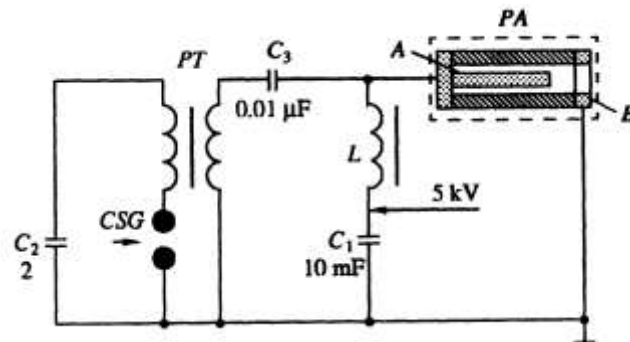


Рис. 1. Электрическая схема подключения ЭАПУ [8, 9]: А и В – электроды, РА – трубчатый разрядник, C_1 – емкостной накопитель энергии (10 мкФ), C_2 – накопитель «спускового» устройства, C_3 – блокирующий накопитель, L – катушка нелинейной индуктивности, РТ – трансформатор, CSG – искровой зазор

ИПО осуществляли при следующих параметрах: накапливаемое в конденсаторе и подаваемое на электроды напряжение – 4 кВ; расстояние между электродами – 50 мм; амплитуда тока – 18 кА. Обработку проводили в среде воздуха при атмосферном давлении. В качестве центрального электрода использовали стержни, изготовленные из быстрорежущей стали P18 по ГОСТ 19265-73 (номинальный состав: 0,73-0,83 % С, 3,8-4,4 % Cr, до 0,5 % Mn; до 0,5 % Si, 17-18,5 W, 1-1,4 % V) и высокохромистого чугуна (ВХЧ) состава: 2,34 % С, 27,39 % Cr, 3,13 % Mn; 1,26 % Si, 0,20 % Ti. Общее количество импульсов варьировалось от 8 до 10. Используя разные катоды и чередуя их при обработке, добивались формирования слоистых покрытий. Были использованы следующие схемы нанесения: № 1 (10W18), № 2 (10Cr28), №3 (5W18+5Cr28), № 4 (5Cr28+5W18), № 5 (2Cr28+2W18+2Cr28+2W18). В обозначении схем число указывает количество импульсов, нанесенных с применением катодов из стали P18 (W18) и ВХЧ (Cr28).

Покрытия наносили на образцы размером 10x10x25 мм, изготовленные из чугуна состава: 2,60 % С; 14,50 % Cr; 3,96 % Mn; 1,38 % Si; 0,10 % Ti; 0,10 % V; 0,21 % Ni. Часть обработанных ИПО образцов подвергали пост-плазменной термической обработке (ППТО) по режиму: нагрев при 950 °С в течение 2 ч с охлаждением в масле. Нагрев проводили в муфельной электрической печи в засыпке из отработанного карбюризатора для предотвращения окисления и обезуглероживания поверхности образцов.

Микроструктуру покрытий исследовали с применением оптического микроскопа Nikon Eclipse M200 после травления 4%-м раствором нитала. Микротвердость измеряли с помощью твердомера FM-300 (Future-Tech) при нагрузке 20-50 г. Испытание на абразивное изнашивание проводили по схеме «Three-body-abrasion» трением о вращающийся резиновый валик диаметром 40 мм с абразивной прослойкой. Абразивом служил электрокорунд крупностью 0,3-0,5 мм; образец прижимался к валику усилием 10 Н; длительность испытания составляла 1 час. Каждые пять минут образец взвешивался на электронных весах ВЛР-20 с точностью 0,0001 г для построения кумулятивной кривой изнашивания.

Результаты исследований и их обсуждение. При исследовании микроструктуры на поверхности всех обработанных образцов были выявлены покрытия с толщиной около 100 мкм (рис.2).

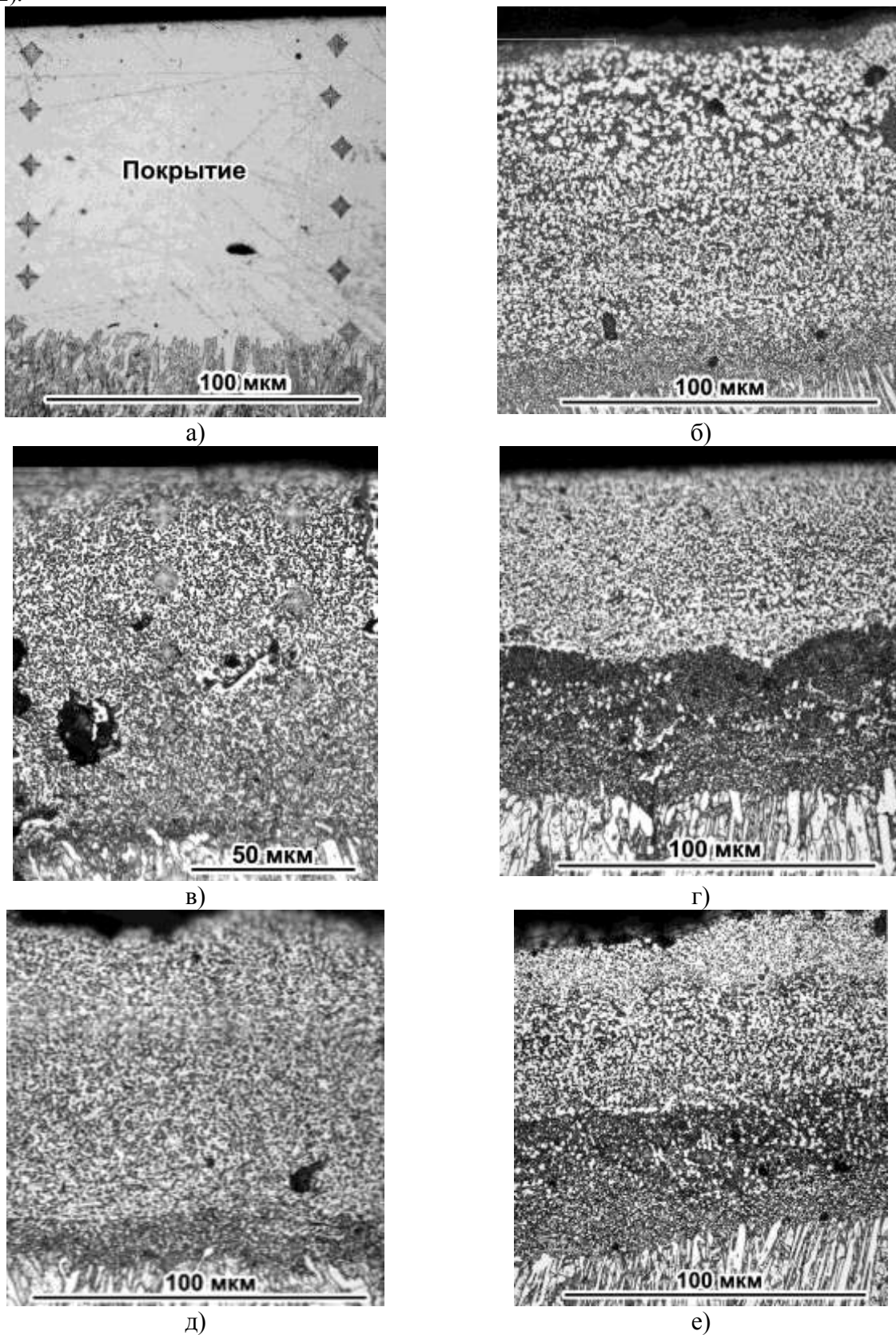


Рис. 2. Микроструктура покрытий, полученных по схемам: № 1 (10W18) (а, б), № 2 (10Cr28) (в), №3 (5W18+5Cr28) (г), № 4 (5Cr28+5W18) (д), № 5 (2Cr28+2W18+2Cr28+2W18) (е) (а – после ИПО, б-е – ИПО+ППТО)

Независимо от схемы нанесения, в состоянии ИПО покрытия имели вид слаботравящегося поверхностного слоя, в пределах которого видны отдельные поры. Как было показано в [11] на основе рентгеновских исследований, в ИПО-состоянии структура покрытий состоит из смеси аустенита и мартенсита с небольшим количеством карбидов цементитного типа. Отсутствие карбидов хрома или вольфрама, характерных для исходной микроструктуры катодов, говорит о том, что при сверхбыстрой кристаллизации переносимого материала катодов на подложке формируется пересыщенный твердый раствор. Во всех покрытиях распределение микротвердости по сечению ИПО-покрытий имеет постоянный профиль, изменяясь в пределах 500-700 HV, что подтверждает данные рентгеноструктурного анализа. Дополнительная термическая обработка привела к резкому повышению микротвердости (до 1200-1600 HV) и изменению микроструктуры покрытий: они приобрели выражено гетерогенное строение с большим количеством дисперсных карбидных включений, распределенных в матрице (рис. 3, зона 1). Для покрытий, нанесенных с чередованием катодов, характерна слоистость, легко выявляемая по разнице в цвете: слои, полученные с применением катода из стали P18, имеют более темный цвет (рис. 2, г). На границе покрытия с основой залегает слой с дисперсной структурой, представляющий собой модифицированную поверхностную зону основы, возникшую в результате ее оплавления под воздействием плазмы [11, 12]. В этой зоне залегают дисперсные карбиды, выделившиеся при ППТО из пересыщенного аустенита (рис. 3, зона 2).

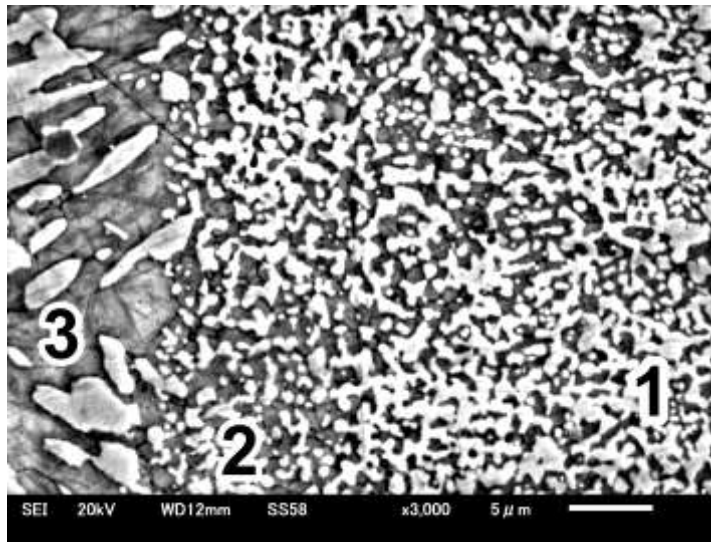


Рис. 3. Микроструктура поверхностного слоя образца, обработанного по схеме №1 (10W18): 1 - покрытие, 2 - модифицированный слой основы, 3 - основа

На рис. 4 представлены результаты испытаний на абразивное изнашивание. Из рис. 4,а,в следует, что для всех режимов ИПО максимальный износ фиксируется после первых 5-10 минут испытаний, затем он резко снижается. Такой характер кривой износа объясняется наличием технологической шероховатости на поверхности образцов, вызванной неравномерностью распределения микрокапель наносимого материала по площади образца. В течение первых циклов испытаний приработка поверхности со срезанием выступов и сглаживанием рельефа, что сопровождается повышенной потерей массы покрытия. После завершения приработки и формирования рабочего рельефа износ стабилизируется, его величина определяется различиями в строении и свойствах материала покрытия. Сравнение кумулятивных кривых износа показывает, что в состоянии ИПО наименьший суммарный (0,034 г) износ имеет слоистое покрытие, нанесенное по схеме № 5 (10W18). Для других вариантов нанесения покрытия суммарный износ имеет близкие значения, варьируясь от 0,0389 г (10Cr28) до 0,041 г (5Cr28+5W18).

Испытание покрытий, подвергнутых пост-плазменной термической обработке, показало, что и в этом случае сохраняется описанный выше ниспадающий характер профиля кривой изнашивания с максимальным износом в начале испытаний. Анализ рис. 4,в показывает, что по уровню износостойкости термообработанные покрытия разделяются на три группы, при этом максимальная разница в суммарном износе между группами достигает 39 %. Наименее износостойким оказалось покрытие 10W18, суммарный износ которого составил 0,0318 г. Средний уровень износостойкости (0,026-0,027 г) продемонстрировали покрытия 10Cr28 и (5W18+5Cr28). И, наконец, самое высокое

сопротивление изнашиванию показали слоистые покрытия (2Cr28+2W18+2Cr28+2W18) и (5Cr28+5W18).

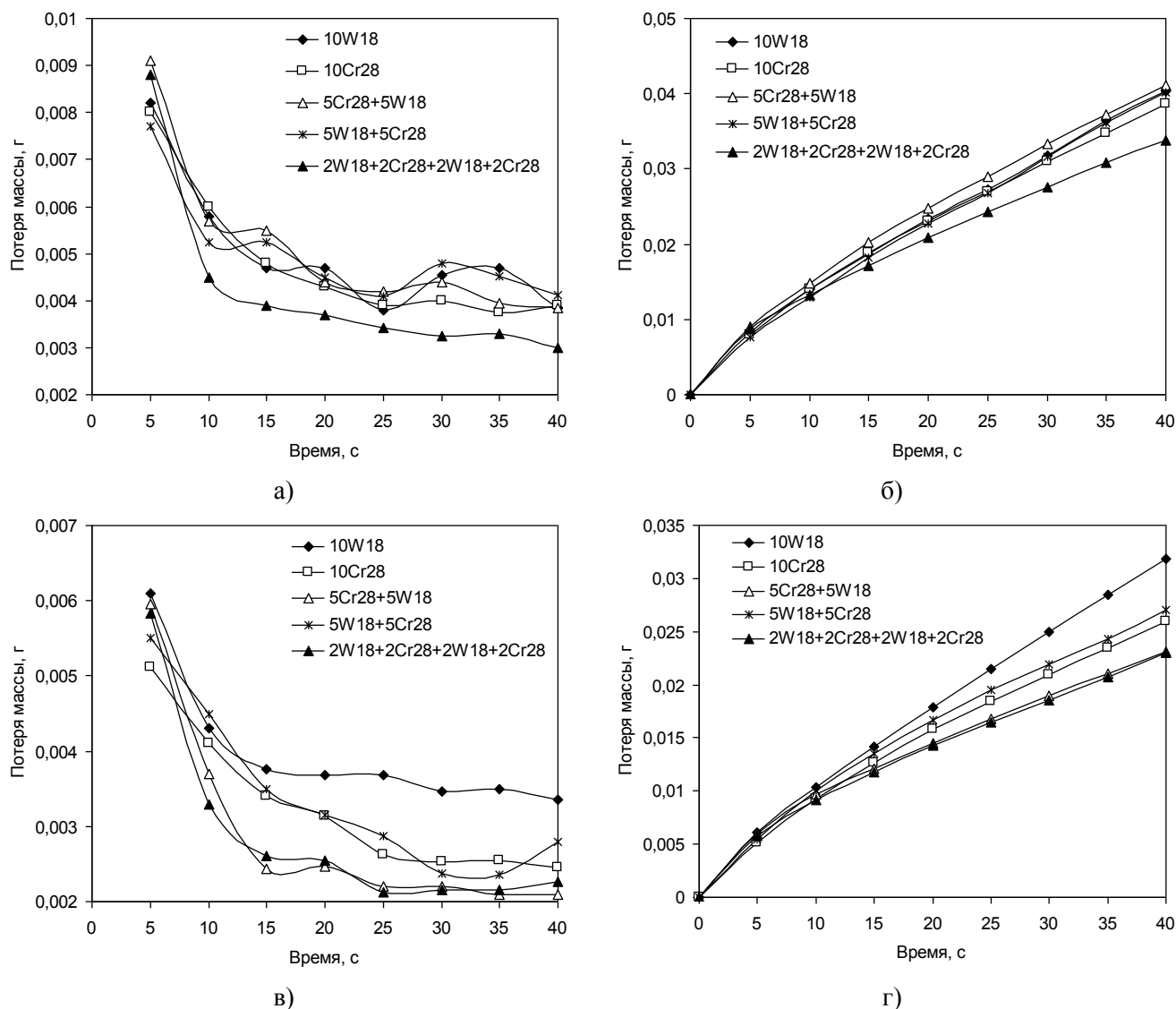


Рис. 4. Изменение потери массы во времени (а, в) и кумулятивные кривые износа (б, г) образцов (а, б – образцы после ИПО, в, г – ИПО+ППТО)

Сравнение результатов испытаний для ИПО и (ИПО+ППТО) обработок показало, что пост-плазменная термическая обработка повысила износостойкость всех исследованных покрытий (рис. 5). Коэффициент снижения износа варьируется от 1,26 (10W18) до 1,77 (5Cr28+5W18). Положительная роль ППТО заключается в протекании процессов, переводящих покрытие в термодинамически устойчивое состояние посредством распада пересыщенного твердого раствора с выделением большого количества карбидов. Обоеднение аустенита углеродом и легирующими элементами привело к повышению мартенситной точки Mn, что облегчило превращение аустенита в мартенсит при закалке масле. Это повысило твердость матрицы, что в совокупности с наличием карбидов обусловило 2-3-кратное повышение микротвердости покрытий по сравнению с ИПО-состоянием.

В ранее выполненных работах [11, 12] на основе результатов рентгеноструктурного анализа и энергодисперсионной спектроскопии показано, что в ходе выдержки при высокой температуре в покрытиях (в зависимости от схемы ИПО) формируются хромсодержащие карбиды M_7C_3 , $M_{23}C_6$, M_3C_2 , а также вольфрамсодержащие карбиды M_6C и M_2C . В слоистых покрытиях существуют переходные зоны, в которых за счет взаимного диффузионного обогащения карбиды легированы как хромом, так и вольфрамом. Очевидно, что это оказывает существенное влияние на трибологические свойства карбидов, поскольку, как показали испытания на износ, лучшая износостойкость характерна именно для слоистых покрытий. Наиболее износостойким следует признать покрытие,

нанесенное по схеме № 5 (2Cr28+2W18+2Cr28+2W18); оно имело минимальный износ как в ИПО-состоянии, так и после дополнительной термической обработки. Применение катода из стали P18 для нанесения монопокрытий представляется малоэффективным, несмотря на высокое содержание вольфрама: износостойкость таких покрытий оказывается пониженной ввиду недостаточного количества карбидов, что связано с общим невысоким содержанием углерода в этой стали. Здесь полезным оказывается попеременное использование катодов, что позволяет обогащать вольфрам-содержащие слои хромом и углеродом за счет диффузии этих элементов из слоев, наносимых с применением катода из более углеродистого высокохромистого чугуна.

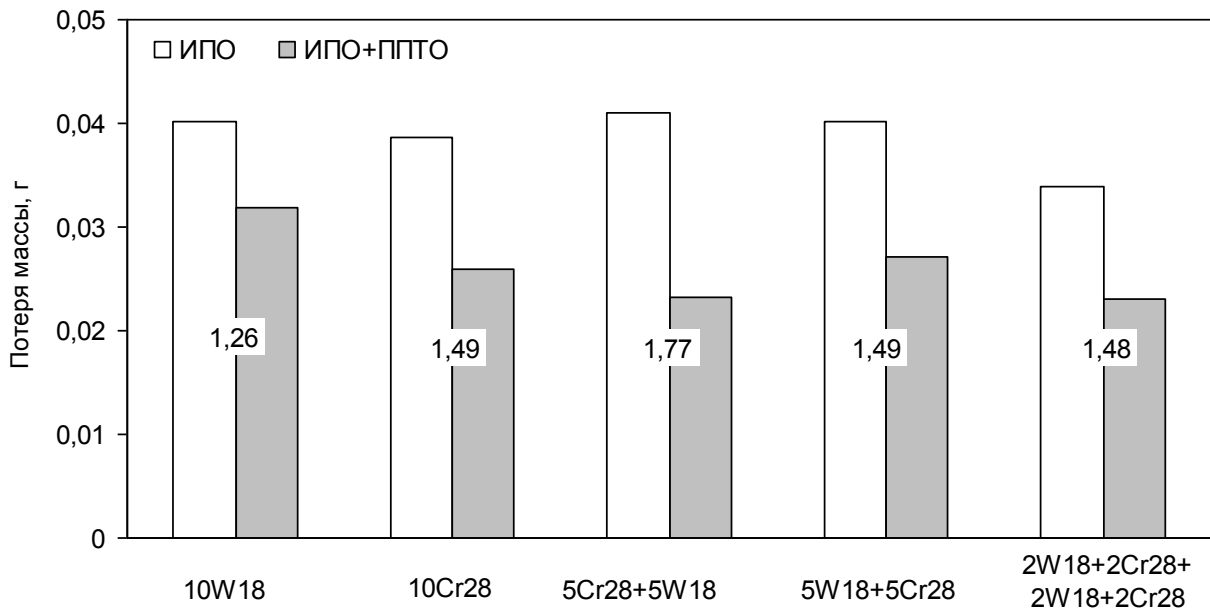


Рис. 5. Изменение суммарного износа покрытий в результате ППТО (числа - значения коэффициента снижения износа)

Представленные данные показывают, что импульсно-плазменная обработка с применением катодов из высоколегированных хром/вольфрам-содержащих сплавов в сочетании с пост-плазменной закалкой обеспечивает формирование износостойких покрытий на металлических поверхностях. Оптимизация схемы нанесения покрытий и сочетания материалов катода представляет интерес для дальнейших исследований.

Выводы.

1. Импульсно-плазменная обработка с применением электротермического аксиального плазменного ускорителя обеспечивает модифицирование поверхности с одновременным нанесением покрытия. Покрытие формируется в основном за счет плазменного переноса материала катода.

2. Варьированием материала катода (сталь P18 и чугун с 28 % Cr) получены монопокрытия или слоистые покрытия толщиной около 100 мкм с различным содержанием вольфрама и хрома. Сразу после ИПО покрытия имеют однородную слаботравящуюся структуру с твердостью 500-700 HV. Дополнительная термическая обработка приводит к выделению большого количества дисперсных карбидов, легированных вольфрамом и (или) хромом, что повышает микротвердость покрытий до 1200-1600 HV и на 26-77 % - их абразивную износостойкость.

3. Наиболее высокой износостойкостью из исследованных вариантов обладает слоистое покрытие (2Cr28+2W18+2Cr28+2W18), полученное чередованием катодов при ИПО, что объясняется формированием сложнелегированных карбидов в диффузионных переходных зонах между отдельными слоями.

Литература.

1. Батраченко А. В. Влияние импульсно-плазменной обработки на микроструктуру и свойства стали 65Г / А. В. Батраченко // Проблемы трибологии. – 2014. - № 3. - С. 86-92.
2. Özbek Y. Y. Surface behavior of AISI 4140 modified with pulsed-plasma technique / Y. Y. Özbek, M. Durman //

Materiali in tehnologije (Materials and technology). – 2015. - №49 (3). - P. 441–445.

3. Kovaleva M. Characterization of Al₂O₃ coatings by multi-chamber gas-dynamic accelerator / [M. Kovaleva, Yu. Tyurin, N. Vasilik](#) [etc] // Surface and Coating Technology. – 2013. – № 232. – P. 719–725.

4. Погребняк А. Д. Импульсно-плазменная модификация свойств поверхности и нанесение покрытий / А. Д. Погребняк, Ю. Н. Тюрин // Успехи физического металловедения. – 2003. - Т. 4. - С. 1–66.

5. Romankov S. Pulsed plasma treatment of [Ti–Al coatings produced by mechanical alloying method](#) / S. Romankov, A. Mamaeva, S. D. Kaloshkin [etc] // Materials Letters. – 2007. - Vol. 61. - P. 5288-5291.

6. Тюрин Ю. Н. Плазменные упрочняющие технологии / Тюрин Ю. Н., Жадкевич М. Л. – К.: Наукова думка, 2008. – 215 с.

7. Sartowska B. Phase changes in steels irradiated with intense pulsed plasma beams / [B. Sartowska, J. Piekoszewski, L. Waliś](#) [etc] // Vacuum. - 2003. – № 70. – P. 285–291.

8. 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.

9. Kolyada Yu. E. Formation mechanism of the metallic nanostructures using pulsed axial electrothermal plasma accelerator / Yu. E. Kolyada, V. I. Fedun, V. I. Tyutyunnikov [etc] // Problems of Atomic Science and Technology. Series «Plasma Electronics and New Acceleration Methods». – 2013. - №4 (86). - P. 297-300.

10. Чейлях А. П. Структура и свойства стали 40X после импульсно-плазменной обработки с использованием титанового электрода / А. П. Чейлях, Ю. Ю. Куцомеля, М. А. Рябкина [и др.] // Science and Education a New Dimension: Natural and Technical Science. – 2013. - Vol. 8. - С. 79-84.

11. Efremenko V. G. Pulsed plasma deposition of Fe-C-Cr-W coating on high-Cr-cast iron: effect of layered morphology and heat treatment on the microstructure and hardness / V. G. Efremenko, Yu. G. Chabak, A. Lekatou [etc] // Surface and Coating Technology. – 2016. – Vol. 304. – P. 293–305.

12. Chabak Yu. G. Phase-Structural Composition of coating obtained by pulsed plasma treatment using eroded cathode of T1 high speed steel / Yu. G. Chabak, V. I. Fedun, K. Shimizu [etc] // Problems of Atomic Science and Technology. Series «Plasma Electronics and New Acceleration Methods». – 2016. - № 4. – P.100-106.

Рецензент

Маслов Владимир Александрович, д.т.н., профессор ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет»

Стаття надійшла до редакції 29.04.2017