

## МОДИФИКАЦИЯ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМБИНИРОВАННОГО ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ И МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СВС-КАТОДОВ

А.И. Потекаев, В.М. Савостиков, А.Н. Табаченко, А.Ю. Шубин  
 Сибирский физико-технический институт имени акад. В.Д. Кузнецова  
 Национального исследовательского Томского государственного университета,  
 пл. Новособорная 1, 634050 Томск, Россия,  
 potekaev@spti.tsu.ru, svm.53@mail.ru, tabachenko@spti.tsu.ru, ayshubin@gmail.com

Отражены функциональные особенности комбинированной установки «Композит-3», содержащей в рабочей камере три типа ионно-плазменных источников: дуомагнетрон с двумя распыляемыми мишенями, два электродуговых испарителя и газовый плазмогенератор с накаливаемым катодом. Технологические возможности установки расширены за счет доукомплектования ее многокомпонентными катодами, изготавливаемыми методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). Совокупность указанных аппаратурно-комплектующих элементов позволяет модифицировать свойства поверхностей металлов и сплавов разнообразными методами: ионно-плазменным травлением и очисткой, ионно-плазменным многокомпонентным легированием, азотированием, магнетронным и вакуумно-дуговым нанесением покрытий. При этом возможно осуществлять комбинацию разных методов в едином вакуумно-технологическом цикле, что позволяет формировать градиентно-слоистые структуры поверхностных слоев с заданными функциональными свойствами.

### Введение

Ионно-плазменные технологии в настоящее время получили достаточно широкое применение в промышленности. В частности, на практике используются методы ионно-плазменного азотирования, вакуумно-дугового и магнетронного нанесения покрытий различного функционального назначения. Так называемые «пучковые» методы (например, ионной имплантации) востребованы в меньшей степени. Их применение усложнено узкой направленностью рабочего потока ионизированных частиц, необходимостью сканирования рабочих поверхностей изделий и, следовательно, низкой производительностью. Но и те методы, которые применяются на практике, характеризуются своими особенностями – преимуществами и недостатками. Например, ионно-плазменное азотирование реализуется при относительно высоких температурах – порядка 500 градусов Цельсия и выше. Следовательно, этот способ модификации неприемлем для закаленных сплавов. Метод вакуумно-дугового осаждения покрытий характеризуется высокой производительностью (скоростью осаждения), но имеет такой недостаток как наличие «капельной фазы» в рабочем потоке распыляемого вещества, ухудшающей качество наносимого покрытия. Магнетронное напыление покрытий избавлено от этого недостатка, формируемый рабочий поток осаждаемых частиц состоит практически из отдельных ионизированных атомов. Но этот метод обладает более низкой производительностью, чем вакуумно-дуговое осаждение. С учетом этих обстоятельств, авторы представленного доклада поставили перед собой задачу исследовать возможности разных ионно-плазменных методов для применения на практике, а также перспективность их объединения в едином вакуумно-технологическом цикле с использованием специфических их преимуществ.

### Реализация разных технологических решений на созданном комбинированном оборудовании

Для решения поставленной задачи объединения разных методов в одном вакуумном цикле, на базе системы вакуумной откачки промышленной установки ННВ-6.6-И1, была создана комбинированная установка «Композит-3». Рабочая камера установки содержит два электродуговых испарителя, дуомагнетрон с двумя распыляемыми катодными мишенями и плазменный источник с накаливаемым катодом (ПИНК) [1]. С целью расширения технологических возможностей созданного оборудования также были отработаны способы изготовления многокомпонентных катодов для электродуговых и магнетронных источников плазмы с применением метода самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) [2]. На созданном оборудовании были апробированы различные технологические способы модификации свойств металлов и сплавов с определением потенциальных областей их возможного применения. В частности, были изучены технологические возможности ионно-плазменного азотирования сталей различного состава с применением газового плазмогенератора ПИНК, вакуумно-дугового осаждения и магнетронного напыления износостойких покрытий Ti-Al-Si-N, Ti-B-C, Ti-B-Si-N на режущий инструмент с использованием многокомпонентных СВС-катодов, вакуумно-дугового и магнетронного нанесения антифрикционных покрытий Ti-C-Mo-S на стали и титановые сплавы. В процессе исследований было установлено положительное влияние assisting газоразрядной плазмы, формируемой плазмогенератором ПИНК, на структуру и свойства осаждаемых вакуумно-дуговых [3] и магнетронных [4] покрытий. Например, при ассистировании газоразрядной плазмой при вакуумно-дуговом осаждении покрытия Ti-Al-Si-N, удалось достичь значения твердости порядка 50 ГПа (так называемой

«сверхтвердости» - superhardcoating) и, одновременно, снизить температуру стальной подложки с 500-550°C до 400°C, обеспечивающей получение качественного покрытия с хорошей адгезией - прочностью сцепления - с основой [3]. Аналогичные результаты получены и при магнетронном нанесении покрытия Ti-B-Si-N, где значение сверхтвердости достигается даже при более низких температурах [4]. Это обстоятельство имеет практическое значение для модифицирования (упрочнения) поверхностей закаленных стальных изделий с целью предупреждения их отпуски. Одновременно было установлено, что за счет одновременной ассистирующей бомбардировки ионами высокоплотной плазмы, генерируемыми автономным источником ПИНК, улучшаются показатели адгезии покрытий с подложкой и изменяется характер их изнашивания.

Известно, что так называемая «несущая способность» покрытия, т.е. его сопротивление деформационному разрушению, зависит как от твердости, так и от толщины. С учетом этого обстоятельства нами были проведены исследования в направлении совмещения одновременного магнетронного и вакуумно-дугового – высокопроизводительного - осаждения покрытий в едином вакуумном цикле. Результаты таких исследований отражены в работах [5, 6]. Установлено, что целесообразным методом подготовки поверхности под нанесение функционального покрытия является магнетронно-плазменное легирование (магнетронное распыление с одновременной бомбардировкой осаждаемого материала покрытия энергетически-ускоренными газообразными ионами) поверхностного слоя подложки теми элементами, которые входят в состав осаждаемого покрытия, а далее – магнетронно-плазменное осаждение связующего подслоя с ускоряющим потенциалом на подложке не более 200 В. После этого проводится наращивание слоя покрытия необходимой толщины.

В последние годы нами проводятся исследования в направлении разработки комбинированных способов формирования и изучения свойств многокомпонентного трибологического покрытия Ti-C-Mo-S, содержащего в своем составе, как износостойкие карбидные компоненты, так и антифрикционные составляющие по типу сульфидов молибдена и титана. Первые положительные результаты по снижению коэффициента трения до значения 0.05-0.07 и повышению износостойкости сплавов ВТ6 и ВТ14 на 2-3 порядка (как с обычной крупнозернистой, так и субмикроструктурной) были получены нами в 2011-2012 гг. На основе этих результатов была подана заявка на изобретение и получен патент РФ [7]. В настоящее время нами проводятся исследования трибологических свойств этого покрытия, наносимого на закаленные стали 40X и 20X13 с целью определения потенциальных областей применения разработанного покрытия и комбинированных способов его нанесения [8]. Триботехнические исследования проводятся по схеме «pin-on-disk» при разных нагрузочно-скоростных режимах трения, т.к. общеизвестно, что при разных нагрузках и разных скоростях трения трибологическое по-

ведение фрикционного сопряжения может быть различным [9]. Рисунок 1 иллюстрирует такое различие в характере изменения коэффициента трения в зависимости от количества оборотов диска-подложки из стали 40X с нанесенным покрытием при разных нагрузках на индентор из закаленной стали ШХ-15 и разных скоростях скольжения.

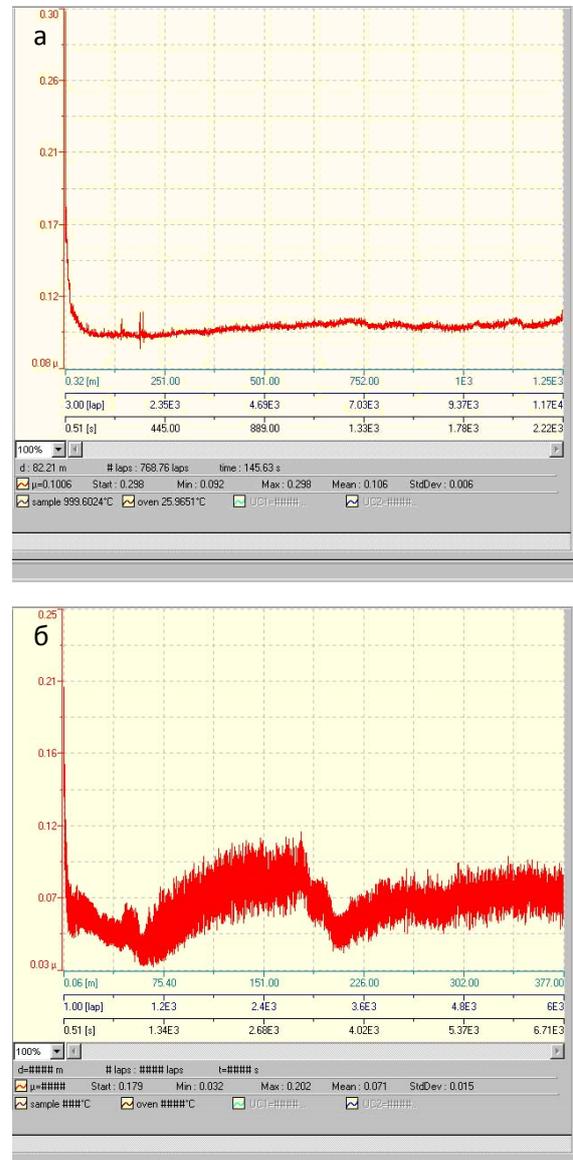


Рис. 1. Изменение значения коэффициента трения  $\mu$  в зависимости от количества оборотов образца-диска с покрытием Ti-C-Mo-S, нанесенного на сталь 40X при  $N=1$  Н,  $V=50$  м/с (а) и  $N=5$  Н,  $V=5$  м/с (б)

Различие во фрикционном поведении при разных нагрузочно-скоростных режимах трения выявлено и для диска-подложки из стали 20X13 с покрытием Ti-C-Mo-S.

### Заключение

На основе проведенных исследований нами подтверждено, что ни один из известных ионно-плазменных методов не обеспечивает всю сово-

купность требуемых функциональных свойств поверхностей металлов и сплавов.

Наиболее перспективным направлением в области модификации свойств поверхностей металлоизделий авторы доклада считают их комбинирование в едином вакуумном цикле, что и было установлено экспериментальными исследованиями.

Полученные результаты исследований подтверждают ранее сформулированный вывод о целесообразности использования разных методов при модификации свойств конкретных металлоизделий и, самое главное, о перспективности применения комбинированных способов.

### Список литературы

1. Борисов Д.П., Коваль Н.Н., Щанин П.М. // Патент РФ на изобретение № 2116707. БИ. № 21. 27.07.1998
2. Tabachenko A.N., Savostikov V.M., Kudryavzev V.A. etc. // «10th International Conference on Modification of Mate-

rials with Particle Beams and Plasma Flows», Tomsk, Russia, 19-24 September, 2010. Proceedings.P. 562–563.

3. Савостиков В.М., Борисов Д.П., Кузьмиченко В.М. и др. // Изв. вузов. Физика. 2007. №9. Приложение. С. 424-427.
4. Савостиков В.М., Борисов Д.П., Сергеев С.М. и др. // Изв. вузов. Физика. 2007. № 9. Приложение. С. 390-393.
5. Савостиков В.М., Потехаев А.И., Табаченко А.Н. // Изв. вузов. Физика. 2011. № 7. С. 26–34.
6. Савостиков В.М., Потехаев А.И., Кузьмиченко В.М. // Патент РФ на изобретение № 2409703, БИ №2, 20.01.2011г.
7. Савостиков В.М., Табаченко А.Н., и др // Патент РФ на изобретение № 2502828. БИ. № 36. 27.12.2013
8. Shubin A.Y., Potekaev A.I., Savostikov V.M. etc. // 2017 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 168 012038 (<http://iopscience.iop.org/1757-899X/168/1/012038>)
9. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. // Основы расчетов на трение и износ. Москва «Машиностроение», 1977. С. 285.

## MODIFICATION OF THE SURFACE PROPERTIES OF METALS AND ALLOYS USING COMBINED ION-PLASMA EQUIPMENT AND MULTICOMPONENT SHS-CATHODES

A.I. Potekaev, V.M. Savostikov, A.N. Tabachenko, A.Y. Shubin  
 Siberian Physical-Technical Institute of National Research Tomsk State University,  
 1 Novosobornaya sqr., 634050 Tomsk, Russia,  
 potekaev@spti.tsu.ru, svm.53@mail.ru, tabachenko@spti.tsu.ru ayshubin@gmail.com

The functional features of the hybrid facility KOMPOSIT-3, containing three types of ion-plasma sources in the working chamber (duomagnetron with two planar sputter targets, two electric arc evaporators and plasma generator «PINK») are described. The technological capabilities of the facility are expanded by the addition of multicomponent cathodes produced by the self-propagating high-temperature synthesis (SHS). The combination of this technological device allows us to modify the properties of the surfaces of metals and alloys by various methods: ion-plasma etching and cleaning, ion-plasma doping, nitriding, magnetron and vacuum arc coating. In this case, it is possible to combine different methods in a single vacuum-technological cycle, which makes it possible to form gradient-layered structures of surface layers with predetermined functional properties.