

## ИОННО-ПЛАЗМЕННЫЕ, ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВЫЕ И КОМПЛЕКСНЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ ТВЁРДЫХ ТЕЛ

Н.Н. Коваль<sup>1)</sup>, Ю.Х. Ахмадеев<sup>2)</sup>, В.В. Денисов<sup>3)</sup>, М.С. Воробьёв<sup>4)</sup>, В.Н. Девятков<sup>5)</sup>,  
Е.В. Островерхов<sup>6)</sup>, С.С. Ковальский<sup>7)</sup>, В.В. Яковлев<sup>8)</sup>  
<sup>1-8)</sup>Институт сильноточной электроники СО РАН, пр. Академический 2/3, Томск 34055,  
Россия, <sup>1)</sup>koval@opee.hcei.tsc.ru, <sup>2)</sup>ahmadeev@opee.hcei.tsc.ru, <sup>3)</sup>denisov@opee.hcei.tsc.ru,  
<sup>4)</sup>vorobyovms@yandex.ru, <sup>5)</sup>vlad@opee.hcei.tsc.ru, <sup>6)</sup>evgeniy86evgeniy@mail.ru,  
<sup>7)</sup>kovalsky@opee.hcei.tsc.ru, <sup>8)</sup>vlad000@rambler.ru

Рассмотрены принцип действия, конструкции, основные характеристики и параметры, а также примеры применения новых и модернизированных электронно-ионно-плазменных установок, созданных в Институте сильноточной электроники СО РАН. Установки используют объёмные плазменные образования, генерируемые разрядами низкого давления, в качестве рабочей среды для обработки помещённых в неё материалов и изделий либо в качестве имитирующей электроны плазмы в источниках электронов с плазменным катодом. Комплексные электронно-ионно-плазменные установки позволяют в едином вакуумном цикле осуществлять ионно-плазменную очистку, активацию и азотирование поверхности металлических материалов, создавая протяжённый (десятки-сотни микрометров) подслоя, на которой электродуговым или магнетронным методом с плазменным ассистированием наносится тонкий (единицы микрометров) функциональный слой, что позволяет существенно (единицы-десятки раз) улучшить износостойкость обработанной таким образом поверхности образцов и изделий.

С использованием результатов приведённой работы создан вакуумный электронно-ионно-плазменный стенд для *in situ* исследований структур, формируемых электронно-ионно-плазменными методами с использованием синхротронного излучения.

**Ключевые слова:** разряды низкого давления; объёмные пучково-плазменные образования; ионно-плазменная обработка; электронно-пучковая модификация; комплексное электронно-ионно-плазменное оборудование; модификация поверхности.

## ION-PLASMA, ELECTRON-BEAM AND COMPLEX FACILITIES FOR SURFACE MODIFICATION OF MATERIALS

N.N. Koval<sup>1)</sup>, Yu.H. Akhmadeev<sup>2)</sup>, V.V. Denisov<sup>3)</sup>, M.S. Vorobyov<sup>4)</sup>, V.N. Devyatkov<sup>5)</sup>,  
E.V. Ostroverkhov<sup>6)</sup>, S.S. Kovalsky<sup>7)</sup>, V.V. Yakovlev<sup>8)</sup>  
*Institute of High Current Electronics SB RAS, 2/3 Akademicheskyy Ave., 634055 Tomsk, Russia,*  
<sup>1)</sup>koval@opee.hcei.tsc.ru, <sup>2)</sup>ahmadeev@opee.hcei.tsc.ru, <sup>3)</sup>denisov@opee.hcei.tsc.ru,  
<sup>4)</sup>vorobyovms@yandex.ru, <sup>5)</sup>vlad@opee.hcei.tsc.ru, <sup>6)</sup>evgeniy86evgeniy@mail.ru,  
<sup>7)</sup>kovalsky@opee.hcei.tsc.ru, <sup>8)</sup>vlad000@rambler.ru

The principle of operation, design, main characteristics and parameters, as well as examples of the use of new and modernized electron-ion-plasma facilities created at the Institute of High-Current Electronics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences are considered. The facilities use volumetric plasma formations generated by low-pressure discharges. These plasma formations are used as a working medium for treatment of materials and products or as an electron-emitting plasma in electron sources with a plasma cathode. Complex electron-ion-plasma facilities make it possible to carry out ion-plasma cleaning, activation and nitriding of the surface of metal materials, as well as the application of functional coatings in a single vacuum cycle. Nitriding leads to the formation of an extended (tens to hundreds of micrometers) sublayer, on which a thin (several micrometers) functional layer is deposited by the electric arc or magnetron method with plasma assistance. This makes it possible to significantly (a few to tens of times) improve the wear resistance of the surface of samples and products treated in this way.

Using the results of this work, a vacuum electron-ion-plasma stand was created for *in-situ* synchrotron studies of structures formed by electron-ion-plasma methods.

**Keywords:** low pressure discharges; volumetric beam-plasma formations; ion-plasma treatment; electron-beam modification; complex electron-ion-plasma equipment; surface modification.

## Введение

Современная промышленность остро нуждается в технологиях упрочнения поверхности материалов и изделий для существенного увеличения их срока службы. Одними из самых перспективных представляются технологии электронно-ионно-плазменной обработки, которые обеспечивают высокое качество при приемлемой производительности и экологичности технологического процесса [1, 2]. За последние годы в Институте сильноточной электроники СО РАН (г. Томск) разработали ряд новых и модернизировали действующие электронно-ионно-плазменные установки, на которых реализуются новые процессы, являющиеся основой инновационных технологий модификации поверхности с целью повышения её эксплуатационных свойств и повышения срока службы изделий с модифицированной поверхностью. Основой всех создаваемых в ИСЭ СО РАН установок являются объёмные плазменные образования, генерируемые в разрядах низкого давления. Такие плазменные структуры используются либо для непосредственной обработки помещаемых в них образцов или изделий, либо для извлечения из плазмы заряженных частиц для последующего их ускорения и дальнейшего использования уже пучка заряженных частиц.

Важным и перспективным следует считать разработку и создание комплексных установок, сочетающих в едином вакуумном цикле ионно-плазменную и электронно-пучковую обработку поверхности, что даёт синергетический эффект многократно повышая срок службы обработанных материалов и изделий.

На примере нескольких электрофизических установок рассмотрены принцип действия, основные параметры, особенности режимов и применения электронно-ионно-плазменных процессов для модификации поверхности материалов и изделий.

## Основная часть

Для ионно-плазменной очистки, активации и азотирования поверхности образцов и изделий разработана и создана установка на основе самостоятельного тлеющего разряда при низких 0.01-1 Па давлениях в котором генерируются однородные объёмные пучково-плазменные образования с концентрацией плазмы  $10^{15}$ - $10^{17}$  м<sup>-3</sup> в объёме  $\approx 0,3$  м<sup>3</sup> при однородности плотности не хуже  $\pm 30\%$  от среднего значения. Установка имеет непрерывный, импульсный и импульсно-периодический режимы работы, которые обеспечиваются горением самостоятельного тлеющего разряда при токах единицы-сотни ампер и напряжении горения десятки-сотни вольт, который инициируется и контролируется в свою очередь специальными аксиально-симметричными плазмогенераторами на основе самостоятельного дугового разряда с комбинированным накаливаемым и полым катодами типа «ПИИНК». При средней мощности основного разряда до 25 кВт плазма, генерируемая в объёме полого катода, роль которого играет рабочая вакуумная камера, обеспечивает среднюю плотность ионного тока на помещённые в установку образцы и изделия до 10 мА/см<sup>2</sup>. Общий вес загружаемых изделий достигает 150 кг, а процесс их ионно-плазменной обработки (очистка, активация, азотирование) составляет несколько часов, после которого срок службы обработанного инструмента и титановой штамповой оснастки возрастает в 2-6 раз.

Созданная в последние годы ионно-плазменная установка «ЭЛИОН» сочетает использование в одном вакуумном цикле финишную подготовку и азотирование поверхности в плазме, генерируемой протяжённым (с апертурой 600x40 мм) плазмогенератором «ПИИНК-П» на основе самостоятельного дугового разряда низкого давления, и последующее плазменно-ассистированное электродуговое или магнетронное напыление финишного функционального слоя с использованием про-

тяжённого электродугового испарителя с катодом 600x100 мм или протяжённой магнетронной распылительной системы с катодом-мишенью 600x140 мм. Отличительной особенностью технологического цикла обработки является применение электронно-ионного (элионного) азотирования, суть которого заключается в том, что при подаче на обрабатываемый образец или изделие смещения переменной полярности происходит быстрый нагрев до необходимой температуры (положительная полярность) и затем при смене полярности (отрицательная полярность) осуществляется бомбардировка поверхности ионами азота с очисткой от образующихся плёнок, блокирующих диффузию атомарного азота вглубь материала, и собственно азотирование с образованием слоя толщиной в десятки-сотни микрометров в зависимости от материала подложки, температуры, времени азотирования и других параметров, влияющих на процесс. При элионном азотировании происходит периодическая смена полярности таким образом, чтобы поддерживалась температура подложки и не происходило растравливания её поверхности, чем и обуславливается конкурентное преимущество реализованного метода азотирования перед традиционными. На созданный азотированный упрочнённый подслоя в следующем цикле напыляется функциональный финишный слой обычно толщиной несколько микрометров. Т.к. весь процесс осуществляется в едином вакуумном цикле, то обеспечивается хорошая адгезия финишного слоя с подложкой, а плазменное ассистирование способствует формированию плотного слоя с прогнозируемой структурой. Обработанные на установке «ЭЛИОН» материалы и изделия существенно улучшают свои функциональные свойства.

Импульсные объёмные плазменные образования, создаваемые дуговым разрядом низкого давления, являются перспективной рабочей средой для извлечения электронов при создании источников

электронов с плазменным катодом. Использование мелкоструктурной металлической сетки для фиксации и стабилизации границы синтезируемой в разряде плазмы позволило разработать и создать ряд источников электронов с сеточным плазменным эмиттером (СПЭ), которые отличаются рядом общеизвестных преимуществ перед другими, традиционно используемыми источниками, например, с термо- или взрывоэмиссионными катодами. Модернизированный источник с СПЭ «СОЛО» обеспечивает пучок диаметром до нескольких сантиметров с током пучка 10-500 А при ускоряющем напряжении 5-25 кВ и длительности импульсов 20-500 мкс и частоте их следования от одиночных до  $10 \text{ с}^{-1}$ . Реализуемая при этом плотность энергии электронов пучка на обрабатываемой подложке лежит в диапазоне от единиц до сотни джоулей на квадратный сантиметр, что позволяет расплавлять поверхность образца за импульс на глубину от нескольких микрометров до десятков микрометров (в зависимости от материала), а затем, после прекращения импульсного пучкового воздействия, происходит сверхбыстрое (со скоростью  $10^4$ - $10^6 \text{ K/c}$ ) охлаждение расплавленного поверхностного слоя с формированием предельных градиентов температуры (до  $10^7$ - $10^8 \text{ K/m}$ ) за счёт теплоотвода в интегрально холодный внутренний объём материала, что создаёт условия для образования в поверхностном слое субмикро- и нанокристаллической структуры (закалки), а также выглаживания (электронно-пучковой полировки) этого слоя за счёт сил поверхностного натяжения при остывании расплава из жидкого до твёрдого состояния. Проведённые эксперименты показали, что процессы импульсной пучковой обработки ведут к кратному повышению твёрдости поверхности образцов за счёт закалки и, соответственно, многократному уменьшению износа и повышению срока службы изделий с обработанной пучком поверхностью.

Проведённые работы позволили разработать и создать комплексную электронно-ионно-плазменную установку «КОМПЛЕКС», включающую как ионно-плазменную, так и импульсную электронно-пучковую обработку поверхности материалов и изделий. Установка имеет две рабочие зоны (вакуумные камеры), имеющие общую турбомолекулярную откачку и предназначенные для каждой из двух обработок. Ионно-плазменная обработка включает очистку, активацию, азотирование в плазме, генерируемой плазмогенератором «ПИНК» и напыление покрытий вакуумно-дуговым или магнетронным плазменно-ассистированным методом. Затем образец (или изделие) с использованием 3D манипулятора перемещается в зону электронно-пучковой обработки, где подвергается воздействию электронного пучка, создаваемого источником с СПЭ (энергокомплекс «СОЛО»), что приводит к перемешиванию (миксингу) напылённого слоя с подложкой и формированию адгезионно-прочного поверхностного микросплава с прогнозируемыми свойствами. Показано, что в отличие от использования вакуумно-разобщённых установок, такой технологический цикл позволяет в десятки раз повысить износостойкость поверхности при испытаниях в условиях сухого трения.

Результаты проведённых исследований использовались при создании специализированного вакуумного электронно-ионно-плазменного стенда для *in situ* исследований условий формирования структур с использованием синхротронного излучения синхротрона ВЭПП-3 (канал №6), работающего в ИЯФ СО РАН. В настоящее время созданный стенд проходит этап пуско-наладочных испытаний и пробных включений.

### Заключение

Таким образом, созданные лабораторные электронно-ионно-плазменные установки на основе объёмных плазменных образований, проведённые с их использо-

ванием экспериментальные исследования и реализованные новые технологические процессы, создают основу для разработки нового класса производственного пучково-плазменного оборудования для модификации поверхности материалов и изделий с целью кратного повышения их срока службы. Продемонстрированные эффекты улучшения физико-механических и эксплуатационных свойств модифицированных поверхностей различных материалов требуют дополнительных исследований с целью оптимизации параметров обработки и всестороннего изучения структуры и свойств поверхности после электронно-ионно-пучковой обработки. Особо следует отметить возможности, которые открываются при использовании комплексного вакуумного электронно-ионно-плазменного стенда, на котором планируется исследование структуры, слоёв и покрытий в процессе их роста и формирования при диагностике *in situ* с использованием синхротронного излучения. Это позволит существенно сократить время оптимизации режимов синтеза функциональных слоёв с заранее прогнозируемой структурой и свойствами, т.к. будет возможность изменять режимы обработки во время технологического процесса и в режиме реального времени направлять и отслеживать изменение формируемых структур, используя высокую яркость источника синхротронного излучения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Министерства науки и высшего образования (проект № 075-15-2021-1348) в рамках мероприятия номер № 3.2.6.

### Библиографические ссылки

1. Электронно-ионно-плазменная модификация поверхности цветных металлов и сплавов. Под общ. ред. Коваля Н.Н. и Иванова Ю.Ф. Томск: изд-во НТЛ; 2016. 312 с.
2. Эволюция структуры поверхностного слоя стали, подвергнутой электронно-ионно-плазменным методам обработки. Под общ. ред. Коваля Н.Н. и Иванова Ю.Ф. Томск: изд-во НТЛ; 2016. 304 с.