ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
№ 12 ФИЗИКА 2010

УДК 537.523.9

М.А. ШУЛЕПОВ, Ю.Х. АХМАДЕЕВ, В.Ф. ТАРАСЕНКО, Ю.А. КОЛУБАЕВА, О.В. КРЫСИНА, И.Д. КОСТЫРЯ

МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ МЕДИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ОБЪЕМНЫМ РАЗРЯДОМ, ИНИЦИИРУЕМЫМ ПУЧКОМ ЭЛЕКТРОНОВ ЛАВИН В АЗОТЕ И CO_2 АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ[1]

Приведены результаты экспериментальных исследований воздействия объемного разряда, инициируемого пучком электронов лавин (ОРИПЭЛ), на поверхность медных образцов. Объемный (диффузный) разряд в азоте и CO_2 атмосферного давления формировался при подаче на трубчатый катод из фольги импульсов высокого напряжения наносекундной длительности. Установлено, что при обработке в ОРИПЭЛ поверхности меди происходит увеличение твердости поверхностного слоя при ее оксидировании.

Ключевые слова: *разряд, модификация поверхности, взаимодействие плазмы с веществом.*

Введение

В настоящее время для модификации поверхностных слоев различных материалов широко используются разряды различных типов, а также электронные пучки [1–3]. В работах [4, 5] сообщалось о возможности применении объемных разрядов, инициируемых пучком убегающих электронов (ОРИПЭЛ) при атмосферном давлении, для очистки от углерода и оксидирования поверхностей фольг из меди и Al–Be. При использовании ОРИПЭЛ происходит комплексное воздействие на поверхность образца. Во-первых, оказывает воздействие плазма плотного наносекундного разряда с удельной мощностью энерговклада в сотни мегаватт на кубический сантиметр. Во-вторых, на поверхность действует оптическое излучение различных спектральных диапазонов (в том числе УФ, ВУФ и рентгеновского) из плазмы разряда. В-третьих, воздействие оказывает сверхкороткий лавинный электронный пучок (СЛЭП) с широким энергетическим спектром. Данный разряд детально исследовался в работах [6, 7], где было показано, что первой стадией ОРИПЭЛ является импульсный коронный разряд. Перемыкание промежутка плотной плазмой происходит за счет распространения фронта волны ионизации, скорость которого достигает 10 см/нс. Волна ионизации распространяется от электрода с малым радиусом кривизны в независимости от его полярности. После прихода фронта волны ионизации на противоположный электрод напряжение на промежутке уменьшается, а разрядный ток через промежуток увеличивается. Разряд начинает соответствовать аномальному тлеющему разряду, при котором эмиссия электронов с катода обеспечивается, в основном, за счет взрывной эмиссии электронов.

Цель настоящей работы – исследование воздействия плазмы объемного разряда в азоте и CO_2 атмосферного давления, инициируемого пучком убегающих электронов, на состав и свойства приповерхностных слоев меди.

Экспериментальная часть

Исследование проводились на специально сконструированном экспериментальном стенде, разрядная камера которого показана на рис. 1.

Разрядная камера представляет собой полый цилиндр с внутренним диаметром 36 мм и длиной 44 мм, на его боковой поверхности имеется два отверстия, одно из которых закрыто кварцевым стеклом *1* для проведения визуального контроля, а через другое осуществляется вакуумная откачка *2*. На одном из торцов разрядной камеры, через изолятор *3*, размещен стержневой катододержатель *4* диаметром 6 мм, на торце которого устанавливался трубчатый катод *5*, изготовленный из фольги толщиной ~ 100 мкм (сталь 12Х18Н10Т). За счет такой формы электрическое поле

[1] Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 09-08-00030-а, а также частичной поддержке государственного контракта № П 1626 в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на базе НОиИЦ «Наноструктурные материалы и нанотехнологии» БелГУ.

концентрировалось на острой кромке катода. Противоположный торец камеры закрыт фланцем *6* с отверстием, который являлся анодом и также был изготовлен из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Расстояние между плоским анодом и трубчатым катодом составляло во всех экспериментах 11–13 мм. Для уменьшения краевых эффектов исследуемые образцы *7* диаметром 20 мм и толщиной 5 мм устанавливались заподлицо на плоском аноде.

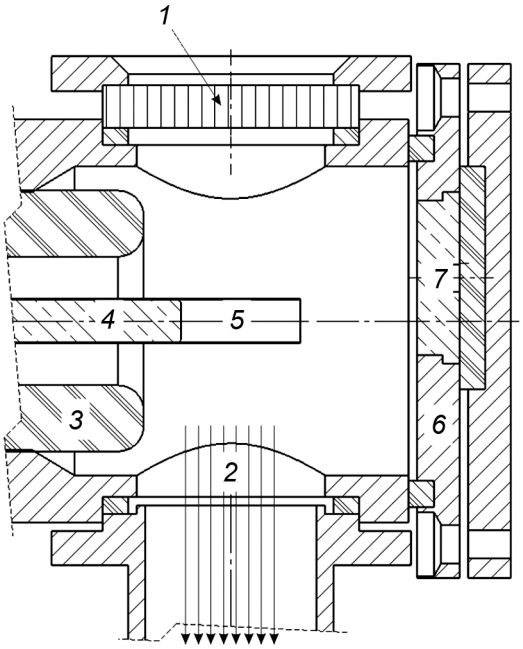

Рис. 1. Схема эксперимента: *1* – кварцевый стекло; *2* – окно для вакуумной откачки; *3* – изолятор; *4* – катод; *5* – трубчатый наконечник; *6* – анод; *7* – образец

Поскольку диаметр области эффективного воздействия разряда на поверхность анода составляет ~ 25 мм, то для более точного выявления всех областей воздействия газового разряда местоположение образца было смещено от центра анода на 5 мм.

В качестве источника импульсного напряжения использовался генератор РАДАН-150, формировавший импульсы напряжения с амплитудой ~ 150 кВ (напряжение холостого хода), длительностью импульса на полувысоте ~ 1,5 нс (на согласованной нагрузке) и временем нарастания ~ 0,3 нс [8]. В качестве материала исследований использовалась медь, алюминий и конструкционная сталь 40Х. Облучение образцов проводилось в импульсно-периодическом режиме с частотой следования импульсов 1 Гц в азоте и CO_2 при атмосферном давлении.

Результаты и их обсуждение

После воздействия объемным разрядом на поверхности медных образцов можно выделить три характерные области (рис. 2). Первая область диаметром ≈ 15 мм соответствует диаметру плотной плазмы объемного разряда. Здесь, согласно предварительным исследованиям [5], происходит наилучшая очистка поверхности образца от углерода. Далее следует область *2* в виде темного кольца с шириной ≈ 2 мм, где плотность тока разряда существенно уменьшалась, а концентрация углерода в поверхностном слое увеличивалась [4, 5]. За областью *2* находится периферийная зона *3*, в которой плотности тока разряда и тока пучка электронов были минимальными.

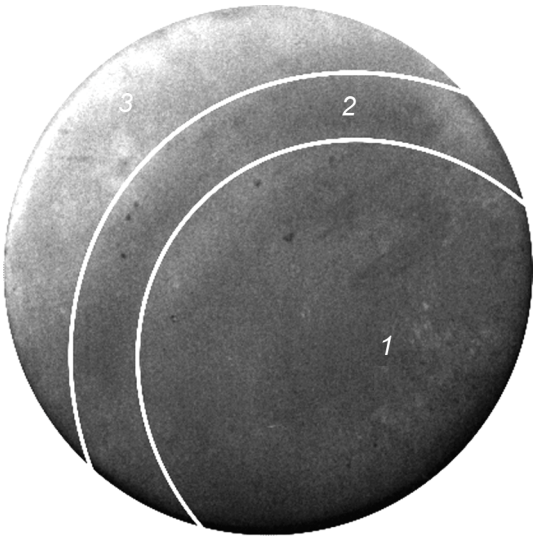

Рис. 2. Фотография поверхности медного образца после воздействия 3000 имп. в атмосфере N_2

Визуально изменения на поверхности образцов из алюминия и стали 40Х после воздействия объемным разрядом не наблюдались, поэтому на первом этапе основное внимание было уделено образцам из меди.

Для определения концентрации кислорода использовался растровый электронный микроскоп Quanta 600 FEG (РЭМ) с разрешением до ×1600000, оснащенный интегрированной системой Trident для энергодисперсионного микроанализа. Результаты исследований поверхности меди в центральной области показали увеличение концентрации кислорода более чем в два раза (рис. 3). Полученные с помощью РЭМ данные об оксидировании поверхности меди в кислородосодержащих газах согласуются с результатами, полученными ранее с помощью оже-спектроскопии [4, 5].

Как показали исследования твердости модифицированного слоя (рис. 4), использование в качестве рабочего газа CO_2 приводит к большему увеличению твердости на поверхности медных образцов по сравнению с использованием N_2, что, вероятно, связано с более интенсивным образо-

ванием окислов на поверхности медных образцов в первом случае. Максимальной твердостью обладает поверхностный слой, толщина которого сравнительно мала (несколько нанометров). На это указывает и тот факт, что увеличение твердости поверхностного слоя выявлялось лишь при нагрузке на индентор 0,5 мН (Наноиндентер NanoTest 600 MicroMaterials Ltd., Великобритания). Низкие значения твердости, при увеличении нагрузки на индентор от 0,5 до 2 мН подтверждают предположение о малой толщине модифицированного слоя.

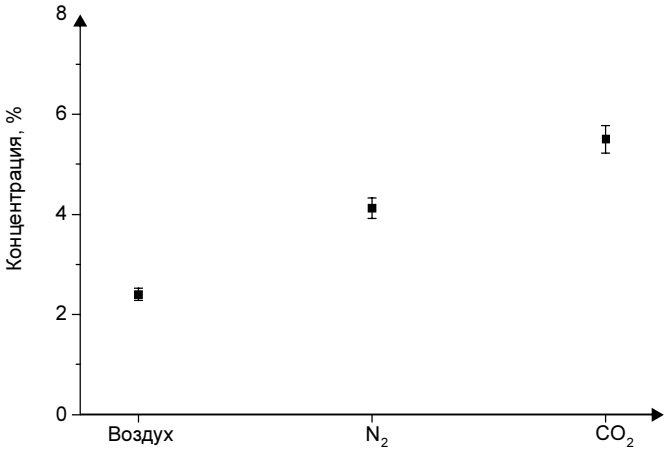

Рис. 3. Изменение концентрации кислорода на поверхности образцов до и после обработки в различных газовых средах

В данной работе основные исследования по воздействию были проведены при использовании катода диаметром 6 мм, однако для практического применения ОРИ-ПЭЛ в процессах обработки материалов необходимо увеличивать размеры обрабатываемой поверхности. С этой целью были проведены исследования возможности создания протяженных разрядов в воздухе атмосферного давления при катоде длиной 70 см и аноде длиной 75 см.

Использовались две конструкции катода. Первый катод в виде лезвия был выполнен из титановой фольги толщиной 50 мкм (рис. 5).

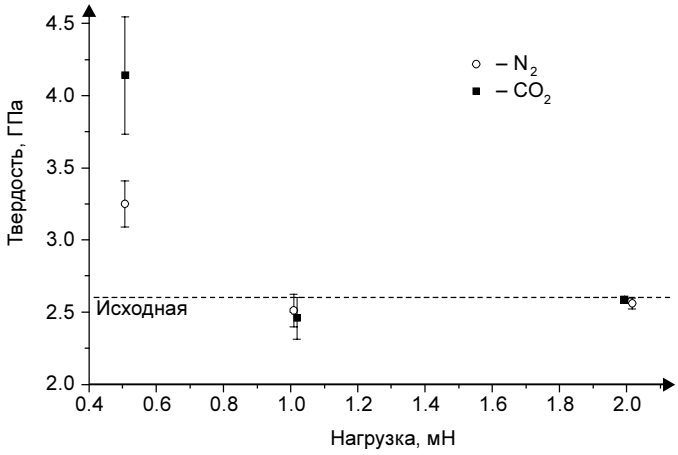

Рис. 4. Зависимость твердости поверхностного слоя медных образцов от нагрузки после обработки в атмосфере различных газов

Второй катод в виде цилиндра диаметром 10 мм был выполнен из алюминиевой тонкостенной трубки. Анод, изготовленный из стального сегмента с закругленными краями, имел радиус кривизны 4 см. Межэлектродный зазор изменялся от 10 до 40 мм. Концы электродов с одной стороны подключались к выходу генератора РАДАН-220 [8]. Генератор с волновым сопротивлением 20 Ом формировал на высокоомной нагрузке импульс напряжения с амплитудой ~ 220 кВ и длительностью на полувысоте ~ 2 нс (при согласованной нагрузке). Фронт импульса напряжения генератора составлял ~ 0,5 нс.

Проведенные эксперименты показали, что в воздухе атмосферного давления могут быть получены различные формы разряда, инициируемого пучком убегающих электронов. При малых зазорах и катоде из фольги диффузный разряд сравнительно быстро переходит в искровую стадию. Интенсивность излучения искровых каналов с зазором ~ 10 мм и менее была существенно больше, чем интенсивность излучения диффузного разряда. При использовании катода из алюминиевого цилиндра контрагирование разряда наблюдалось при всех исследуемых зазорах. За короткое время, обычно единицы наносекунд, диффузный разряд в данных условиях переходил в искровую стадию. Однако при увеличенных межэлектродных зазорах (13–40 мм) и катоде в виде полоски из фольги формировался диффузный разряд. Разряд состоял из множества диффузных струй, которые перекрывались между собой (рис. 5). Длина области эффективного воздействия разряда на поверхность анода составляет в этом случае 70 см и ширина ≈ 5 мм.

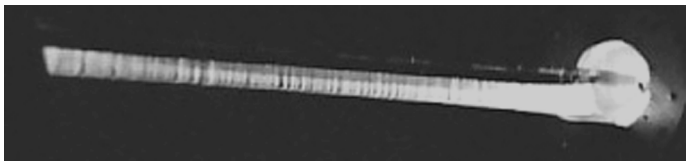

Рис. 5. Фотография разряда в воздухе атмосферного давления при зазоре 13 мм и катоде из фольги (установлен сверху). Генератор справа

Заключение

Проведенные исследования показали, что при обработке в ОРИПЭЛ медных образцов наблюдается оксидирование поверхностного слоя меди. Это, в свою очередь, ведет к увеличению твердости тонкого поверхностного слоя примерно в 1,5 раза. Кроме того, продемонстрирована возможность создания протяженных разрядов ОРИПЭЛ до 70 см, что позволит проводить обработку деталей с такой же длиной.

Авторы благодарят К.В. Оскомова за полезные обсуждения и тестирование образцов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Диденко А.Н., Шаркеев Ю.П., Козлов Э.В., Рябчиков А.И. Эффекты дальнодействия в ионно-имплантированных металлических материалах. – Томск: Изд-во НТЛ, 2004. – 326 с.
2. Лайнер В.И. Защитные покрытия металлов. – М.: Металлургия, 1974. – 559 с.
3. Иванов Ю.Ф., Колубаева Ю.А., Тересов А.Д. и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2009. – № 2. – С. 41–45.
4. Шулепов М.А., Тарасенко В.Ф., Гончаренко И.М. и др. // Письма в ЖТФ. – 2008. – Т. 34. – Вып. 7. – С. 51–57.
5. Tarasenko V.F. and Shulepov M.V. // Pros. of SPIE. Conf. «High – Power Laser Ablation VII». – 2008. V. 7005. – P. 70051N.
6. Baksht E.Kh., Burachenko A.G., Kostyrya I.D., et al. // J. Phys. D. Appl. Phys. – 2009. – V. 42. – P. 185201.
7. Тарасенко В.Ф., Бакшт Е.Х., Бураченко А.Г. и др. // ЖТФ. – 2010. – Т. 80. – Вып. 2. – С. 51–59.
8. Загулов Ф.Я., Котов А.С., Шпак В.Г. и др. // ПТЭ. – 1989. – № 2. – С. 146–149.

Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия
E-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru

Поступила в редакцию 01.04.10.

Шулепов Михаил Александрович, мл. науч. сотр.;
Ахмадеев Юрий Халифович, к.т.н., мл. науч. сотр.;
Тарасенко Виктор Федотович, д.ф.-м.н., профессор, зав. лаб. оптических излучений;
Колубаева Юлия Александровна, мл. науч. сотр.;
Крысина Ольга Васильевна, аспирант;
Костыря Игорь Дмитриевич, ведущ. инженер.