

предел пропорциональности 28 кг/мм^2 , предел прочности 85 кг/мм^2 . Сравнительные характеристики представлены на диаграммах.

Выводы. Установлено, что обработка поверхности образцов ионно-плазменным методом меняет их механические свойства. Ионная очистка поверхности приводит к снижению предела пропорциональности и предела прочности. Нанесение алмазоподобных покрытий и покрытий из нитрида титана влечёт за собой увеличение пределов пропорциональности образцов. Алмазоподобное покрытие увеличивает предел прочности исследуемых образцов, а покрытие из TiN уменьшает его. Микротвёрдость образцов растёт при всех вариантах обработки поверхности [3].

Полученные результаты позволяют считать, что при ионно-плазменном нанесении покрытий приповерхностный слой образца насыщается атомами покрытия, что и приводит к изменению механических свойств [2].

Понижение предела пропорциональности и предела прочности связано с отжигом дефектов при ионной очистке. Повышение этих параметров при нанесении алмазоподобного покрытия связано с тем, что внедренные в приповерхностный слой материала ионы углерода тормозят движение дислокаций и препятствуют выходу их на поверхность, а, как известно из литературы

[4], разрушение материала начинается с поверхностного слоя. Снижение прочностных характеристик при нанесении TiN покрытия связано с тем, что на ионах титана скапливается большое количество дислокаций, это приводит к появлению микропор и микротрещин и вызывающих снижение прочностных характеристик. Повышение микротвёрдости, в обоих случаях, объясняется тем, что микротвёрдость покрытия более высокая, чем основы.

Из сравнительного анализа влияния алмазоподобных покрытий и покрытий из нитрида титана на механические свойства образцов можно сделать вывод, что алмазоподобные покрытия являются перспективными и заслуживают столь же широкого применения, как и покрытия из нитрида титана.

Библиографический список

1. Барвинок В.А. Управление напряженным состоянием. – М.: Машиностроение, 1990. – 384 с.
2. Васильев М.А., Панарин В.Е., Ткачук А.А. Покрытия из нитрида титана, осажденные методом вакуумного дугового разряда (обзор) // *Металлофизика и новейшие технологии.* – 2000. – Т. 22. – С. 58-71.
3. Шемегон В.И. Поверхностное упрочнение спиральных свёрл // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 1998. – №6. – С. 23-29.
4. Ажажа В.М., Ковтун Г.П. Влияние твёрдых поверхностных плёнок на механические свойства металлов: Аналитический обзор. – Харьков: Изд-во ХФТИ. – 1976.

УДК 621.793:621.941.0257

ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ИМПУЛЬСА СИЛЬНОТОЧНОГО ВАКУУМНО-ДУГОВОГО РАЗРЯДА НА ВЕЛИЧИНУ КОЭФФИЦИЕНТА ЭРОЗИИ ГРАФИТОВОГО КАТОДА

В.М. Никитин, А.Я. Колпаков, И.Ю. Гончаров

г. Белгород, Белгородский государственный университет

Углеродные алмазоподобные покрытия, полученные импульсным вакуумно-дуговым методом, обладают высокой твердостью, хорошей адгезией к подложке, стойкостью по отношению к абразивному износу и низким коэффициентом трения [1].

При работе с сверхтонкими пленками необходим жесткий контроль параметров технологического процесса, таких как про-

изводительность процесса, энергия ионов, температура подложки и степень ионизации потока углеродной плазмы. Данная работа посвящена исследованию зависимости коэффициента эрозии графитового катода от длительности импульса разряда. Знание этой зависимости позволит связать производительность процесса с параметрами разрядного импульса.

Катодная форма вакуумной дуги, используемая для получения углеродной плазмы, подробно описана в монографии [2] и обзоре [3]. Однако поведение катодных пятен на графите, в которых происходит эрозия катода, существенно отличается от процессов на металлических катодах. Импульсная форма дугового разряда привносит дополнительные особенности в эти процессы. При изменении длительности импульса изменяется скорость перемещения катодных пятен по поверхности катода и характер эрозии катода. Для стационарного процесса величина эрозии катода определяется зависимостью (1):

$$m = \mu \cdot I \cdot t, \quad (1)$$

где: m – масса эрозии материала катода;
 μ – коэффициент эрозии;
 I – ток дугового разряда;
 t – время горения дуги.

Для импульсного разряда, когда ток дуги не является постоянной величиной, удобно пользоваться зависимостью (2):

$$m = \mu \cdot Q \cdot n = \mu \cdot C \cdot U \cdot n, \quad (2)$$

где: Q – заряд накопителя;
 C – емкость накопителя;
 U – напряжение заряда накопителя;
 n – количество импульсов.

В результате формула для расчета коэффициента эрозии графитового катода импульсного вакуумного дугового разряда принимает вид:

$$\mu = \frac{m}{Q \cdot n}. \quad (3)$$

Особенности конструкции источника углеродной плазмы, описанного в работе [4] и используемого для получения алмазоподобного покрытия, не позволяют применить методику измерения разрядного тока с помощью шунта. Так как в случае импульсного метода получения углеродного покрытия камера не является анодом в отличие от стационарного. Поэтому в данной работе измерения разрядного тока импульсного генератора проводились бесконтактным методом с использованием пояса Роговского [5].

Эксперименты проводились на установке УВНИПА-1-001. Распыление катода, изготовленного из графита марки МПГ-6 осуществлялось импульсным источником

углеродной плазмы. Предварительно вакуумная камера откачивалась до давления $1 \cdot 10^{-3}$ Па. Накопитель емкостью 2000 мкФ заряжался до напряжения 300 В.

Пояс Роговского подключался к запоминающему осциллографу С8-17 через интегрирующую цепочку, состоящую из конденсатора емкостью 4 мкФ и сопротивления 1,2 кОм.

Были получены осциллограммы разрядных токов для шести величин индуктивностей, определяющих длительность разряда. Изменение массы катода фиксировалось после 10 тысяч импульсов с использованием лабораторных весов типа ВЛР-200.

Расчет величины заряда проводился с использованием программного продукта Maple V Release 5., путем интегрирования каждой кривой разрядного тока по длительности импульса.

Результаты измерений и расчетов сведены в табл. 1.

Таблица 1

Длительность импульса, мс	Изменение массы катода, мг	Заряд накопителя, Кл
0,25	270	0,6
0,5	300	0,6
0,75	300	0,6
1,0	240	0,53
1,25	180	0,51
1,5	120	0,6

Зависимость коэффициента эрозии графита от длительности импульса разряда приведена на рис. 1.

Коэффициент эрозии рассчитан по формуле (3) с использованием данных табл. 1.

По данным, приведенным в работе [6], величина коэффициента эрозии графита для стационарного дугового разряда составляет $\mu = 0,17 \cdot 10^{-4}$ г/Кл. Анализ полученных данных показывает, что значение коэффициента эрозии для импульсного разряда существенно выше и зависит от длительности импульса. Увеличение длительности импульса приводит к увеличению размера катодного пятна и уменьшению его подвижности, что характерно для стационарной формы дугового разряда на графитовом катоде. Это явление наблюдается визуально и подтверждается эрозионными следами на катоде. При длительности импульса 1,5 мс вели



Рис. 1. Зависимость коэффициента эрозии графита от длительности импульса разряда.

чина коэффициента эрозии графита приближается к его значению для стационарной формы разряда. Объяснение этого явления можно найти в работе [7], в которой определено различие между двумя типами катодных пятен. К первому типу отнесены быстро движущиеся катодные пятна, испарение материала из которых происходит в результате "микровзрывов", вызванных автоэмиссионным током. Ко второму типу были отнесены "медленные" катодные пятна с преобладанием термоэмиссионных процессов. Характер эрозии материала в пятнах второго рода ближе к термическим процессам испарения, электроннолучевым или лазерным. Очевидно, при увеличении длительности импульса разряда происходит плавный переход от быстрых пятен первого рода к медленным пятнам второго рода. Это приводит к увеличению потерь энергии на разогрев катода и уменьшению доли энергии, расходуемой на процесс эрозии материала катода.

После анализа полученных результатов

были сделаны следующие выводы.

1. Экспериментальным путем установлена зависимость коэффициента эрозии графитового катода от длительности импульса вакуумного дугового разряда.

2. Показано, что коэффициент эрозии графита уменьшается в 2,5 раза при увеличении длительности импульса от 0,25 до 1,5 мс.

3. Максимальное значение коэффициента эрозии в диапазоне длительностей импульса 0,5-0,75 мс составляет $0,5 \cdot 10^4$ г/Кл, что в три раза превышает величину коэффициента эрозии для стационарного дугового разряда. Это позволяет обеспечить наиболее эффективный процесс распыления графита, что определяет производительность процесса.

Библиографический список

1. Бенуа Э.Ф., Великих В.С., Гончаренко В.П., Дмитриев Г.К., Маслов А.И. Углеродные алмазоподобные покрытия // Электронная промышленность. — 1983. — Вып. 6(123). — С. 50-51
2. Кобайн Дж., Эккер Г., Фаррел Дж. и др. // Вакуумные дуги. — М.: Мир, 1982.
3. Блинов И.Г., Доробнов А.М., Минайчев В.Е. и др. // Вакуумные сильноточные плазменные устройства и их применение в технологическом оборудовании микроэлектроники. — М.: ЦНИИ "ЭЛЕКТРОНИКА". — 1974.
4. Маслов А.И., Дмитриев Г.К., Чистяков Ю.Д. Импульсный источник углеродной плазмы для технологических целей // Приборы и техника эксперимента. — 1985. — №3. — С.146-149.
5. Хаддлстоун Р., Леонард С. Диагностика плазмы. — М.: Мир, 1967.
6. Kimblin C.W. Erosion and Ionization in Cathode Spot Regions of Vacuum Arc. // J/ Appl. Phys. 1973. V.44. No.7. P.3074-3081.
7. Канцель В.В. Канд. дисс. // ИВТ АН СССР. — М., 1973.