

4. Макаров И. М., Лохин В. М., Романов С. В. и др. Особенности нечетких преобразований в задачах обработки информации и управления. Ч. II // Информационные технологии. 1999. № 11. С. 24–29.
5. Ильясов Б. Г., Исмагилова Л. А., Валеева Р. Г. Моделирование производственно-рыночных систем. Уфа: УГАТУ, 1995. 321 с.
6. Исмагилова Л. А., Афанасьев В. Ю., Орлова Е. В. Информационная технология оценки и прогнозирования налогового потенциала // Экономика и управление. 2001. № 1. С. 50–53.
7. Недосекин А. О. Применение теории нечетких множеств к задачам управления финансами // Аудит и финансы. 2000. № 2. <http://www.cfin.ru/press/afa/2000-2/index.html>
8. Сергеева И. Г. Интеллектуальное управление производственно-экономической системой в условиях неопределенности на основе имитационного моделирования. Дис. ... канд. техн. наук. / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. Уфа, 2000. 140 с.
9. Ильясов Б. Г., Исмагилова Л. А., Валеева Р. Г. и др. Система поддержки решений на основе нечеткой логики: Свид. об офиц. рег. прогр. для ЭВМ № 990006. 1999.

#### ОБ АВТОРЕ



**Афанасьев Виталий Юрьевич**, аспирант кафедры технической кибернетики УГАТУ. Дипл. инж.-системотехник (УГАТУ, 1999). Готовит диссертацию об экономико-математическом и информационном моделировании социально-экономических систем.

УДК 621.785.532

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПОТОКОВ ЧАСТИЦ С ПОВЕРХНОСТЬЮ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИОННО-ПЛАЗМЕННОМ АЗОТИРОВАНИИ

Р. Д. АГЗАМОВ

Факультет технологии машиностроения УГАТУ  
Тел: (3472) 23 07 63 E-mail: kaf\_TM@mail.rb.ru

Рассматривается процесс ионного азотирования в плазме тлеющего разряда с эффектом полого катода. Применение этого эффекта приводит к интенсификации процессов, происходящих при ионном азотировании, за счет повышения плотности тока

*Ионное азотирование; тлеющий разряд; полый катод*

### ВВЕДЕНИЕ

Долговечность деталей во многом определяется состоянием их поверхности и, в первую очередь, её износостойкостью. Одним из методов повышения износостойкости поверхности деталей является азотирование. Широко используемый в промышленности метод азотирования в диссоциированном аммиаке с применением печного нагрева обладает такими серьезными недостатками, как большая длительность процесса, трудность насыщения азотом легко пассивирующихся высоколегированных сталей, образование хрупкой  $\epsilon$ -фазы на поверхности деталей.

Внедрение процесса ионного азотирования позволило не только избавиться от перечисленных выше недостатков, но и добиться ряда важных преимуществ: большой скорости насыщения; получения диффузионных слоев заданного фазового состава и строения; возможности проведения регулируемых процессов азотирования; незначительных деформаций изделий и высокого класса чистоты поверхности; возможности азотирования пассивирующихся материалов без дополнительной депассивирующей обработки; значительного сокращения общего времени процесса за счет уменьшения времени нагрева и охлаждения партии обрабатываемых деталей и исключения про-

межуточных технологических операций по активации поверхности детали; большой экономичности процесса, повышения коэффициента использования электроэнергии, сокращения расхода насыщающих газов; нетоксичности процесса, который отвечает требованиям по защите окружающей среды.

### 1. СУЩНОСТЬ ПРОЦЕССА ИОННОГО АЗОТИРОВАНИЯ С ЭФФЕКТОМ ПОЛОГО КАТОДА

Ионное азотирование осуществляется с помощью метастабильной формы тлеющего разряда. За счет энергии ионов газа, бомбардирующих поверхность, детали нагреваются до температуры азотирования при одновременной диффузии ионов азота в обрабатываемую поверхность. Все важные процессы в плазме тлеющего разряда, такие как возбуждение, ионизация, диссоциация, а также рекомбинация, происходят в так называемой области катодного падения потенциала [3].

Из катода эмитируются электроны вследствие бомбардировки его поверхности ионами, ускоренными сильным электрическим полем вблизи катода, и быстрыми атомами, а также вследствие фотоэффекта, возникающего благодаря излучению атомов в разряде. Эти электроны, ускоряясь в

направлении анода, приобретают энергию, достаточную для ионизации атомов. Новые электроны, возникшие при ионизации газа, снова ускоряются полем, а положительные ионы летят к катоду и, падая на его поверхность, вызывают эмиссию новых электронов.

Азотирование в плазме тлеющего разряда характеризуется комбинированным процессом испарения-осаждения. Азот в плазме находится в атомарном состоянии и в этой форме химически активен. Перед поверхностью катода происходит образование обогащенных азотом нитридов железа. Молекулы  $FeN$  конденсируются на поверхности детали и диссоциируют, так как при температурах азотирования не стойки и образуют нитриды железа низшего порядка:  $Fe_2N$ ,  $Fe_3N$  и  $Fe_4N$ . Выделяющийся при этом азот диффундирует в деталь [1].

Предполагается, что применение тлеющего разряда с эффектом полого катода при ионном азотировании усиливает все эти процессы, а также диффузию азота в материал, приводя тем самым к увеличению скорости азотирования.

В тлеющем разряде с катодом, имеющим полость, при определенных условиях возникает эффект полого катода, при котором параметры разряда существенно отличаются от параметров разряда с катодом без полости. Эффект полого катода обычно проявляется в значительном повышении плотности тока при одновременном снижении напряжения горения разряда, изменении функции распределения частиц плазмы по скоростям и, как следствие, изменении излучения плазмы. Особенности разряда с полым катодом обуславливают его применение в различных газоразрядных системах [2, 3].

Предложено использовать эффект полого катода для ионного азотирования деталей.

Сущность способа заключается в том, что с помощью специального экрана в виде сетки между обрабатываемой поверхностью и экраном формируется плазма с повышенной концентрацией заряженных частиц (рис. 1).

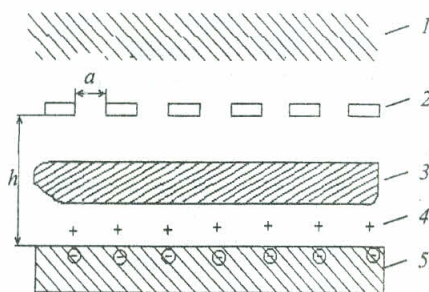


Рис. 1. Схема образования тлеющего разряда с эффектом полого катода: 1 — плазма тлеющего разряда; 2 — технологический экран (сетка); 3 — плазма полого катода; 4 — двойной электрический слой; 5 — обрабатываемая поверхность

Поверхность детали непосредственно становится поверхностью полого катода, что приводит к образованию вблизи обрабатываемой поверхно-

сти структуры из плазмы и слоя пространственного заряда между обрабатываемой поверхностью и границей плазмы. Выход электронов через малые ячейки сетки (экрана) за пределы полости затруднен, так как прикатодные области объемного заряда перекрывают расстояния между ячейками и отражают осциллирующие электроны. В катодной полости, образованной поверхностью детали и экраном увеличивается генерация заряженных частиц осциллирующими электронами, возрастает число ионов, бомбардирующих поверхность, и скорость распыления обрабатываемой поверхности [3].

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА ПРИ ИОННОМ АЗОТИРОВАНИИ

Нагрев детали (катода) в тлеющем разряде зависит от целого ряда параметров: давления в вакуумной камере, тока разряда, напряжения, подаваемого на деталь, рода газа и т. д.

Для определения основных закономерностей при ионном азотировании в тлеющем разряде был проведен ряд экспериментов. Эксперименты проводились на модернизированной установке ЭЛУ-5 с образцами  $10 \times 10 \times 30$  мм из стали 38Х2МЮА, в качестве рабочего газа использовался азот.

В камеру на некотором расстоянии от анода устанавливается деталь. На расстоянии 8–10 мм от поверхности катода устанавливается экран. Обрабатываемая деталь и экран находятся под отрицательным потенциалом (рис. 2).

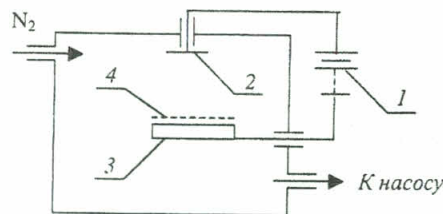


Рис. 2. Устройство для реализации способа ионного азотирования с применением эффекта полого катода: 1 — источник питания; 2 — анод; 3 — катод (деталь); 4 — экран

На рис. 3 приведены экспериментальные зависимости вольт-амперных характеристик тлеющего разряда без эффекта полого катода.

Увеличение напряжения горения тлеющего разряда приводит к увеличению тока разряда. Это объясняется более высокой способностью электронов к ионизации атомов газа, так как с увеличением напряжения горения разряда электроны приобретают более высокую энергию, необходимую для ионизации газа. С увеличением давления увеличивается число заряженных частиц (положительных ионов), которые, ударяясь о поверхность катода, выбивают большее количество электронов, в связи с чем ток разряда также увеличивается.

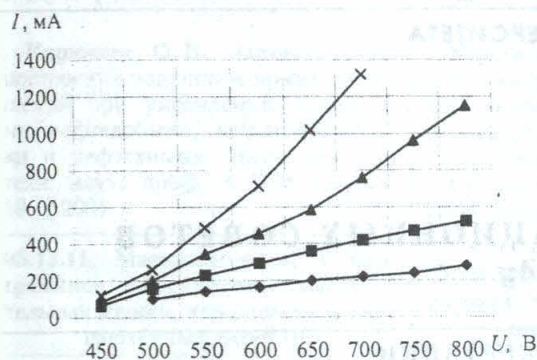


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики тлеющего разряда без эффекта полого катода при  $P = 50$  (♦),  $100$  (■),  $200$  (▲),  $300$  (×) Па

При исследовании вольт-амперных характеристик тлеющего разряда с применением эффекта полого катода (рис. 4) установлено, что ток разряда в несколько раз больше тока тлеющего разряда без применения эффекта полого катода.

Увеличение тока разряда при применении эффекта полого катода объясняется тем, что в катодной полости, образованной поверхностью детали и экраном, увеличивается генерация заряженных частиц осциллирующими электронами, возрастает число ионов, бомбардирующих поверхность, и скорость распыления обрабатываемой поверхности.

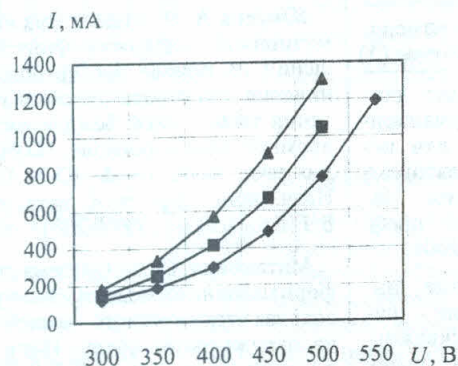


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики тлеющего разряда с эффектом полого катода при  $P = 100$  (♦),  $200$  (■),  $300$  (▲) Па

Анализ зависимостей температуры поверхности от времени показывает, что применение ионного азотирования в тлеющем разряде с эффектом полого катода позволяет увеличить температуру и скорость нагрева поверхности по сравнению с ионным азотированием в тлеющем разряде без применения эффекта полого катода. Это объясняется более высоким током тлеющего разряда при применении эффекта полого катода (рис. 5).

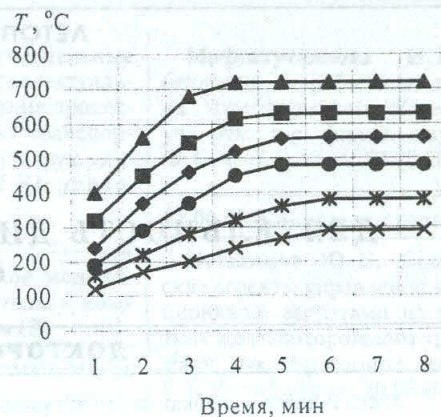


Рис. 5. Зависимость температуры поверхности от времени ( $U = 500$  В) с эффектом полого катода:  $P = 100$  (♦);  $200$  (■);  $300$  (▲) Па, и без него:  $P = 100$  (×);  $200$  (●);  $300$  (•) Па

## ВЫВОДЫ

Анализ экспериментальных зависимостей позволяет сделать вывод, что применение тлеющего разряда с эффектом полого катода позволяет повысить ток разряда в 6–10 раз по сравнению с тлеющим разрядом без эффекта полого катода при одинаковых напряжениях горения разряда и давлениях в камере. Это приводит к интенсификации ионизации атомов азота и процессов распыления-осаждения при ионном азотировании, а также к увеличению температуры и скорости нагрева.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Будилов В. В., Киреев Р. М., Шехтман С. Р. Ионное модифицирование поверхности с использованием эффекта полого катода // Модификация свойств конструкционных материалов пучками заряженных частиц: Тр. 4-й Всерос. конф. Томск, 1996. С. 82–85.
2. Шехтман С. Р. Исследование и разработка технологии нанесения жаростойких покрытий на лопатки турбины ГТД с использованием эффекта полого катода: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 1997.
3. Азотирование и карбонитрирование / Р. Чаттерджи-Фишер и др. М.: Металлургия, 1990. 280 с.

## ОБ АВТОРЕ



Агзамов Рашид Денисламович, аспирант кафедры технологии машиностроения УГАТУ. Дипл. инж.-технолог, магистр техники и технологии (УГАТУ, 1999). Готовит диссертацию о вакуумных ионно-плазменных методах модифицирования поверхности.