

Ионно-плазменная испарительно-распылительная система

В.И. Бибер, А.И. Кузьмичёв

Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт”
03056 Украина, Киев
e-mail: A.Kuzmichev@edd.ntu-kpi.kiev.ua

Предложена электронно-лучевая испарительно-распылительная система с паро-плазменным источником ионов металлов. Система позволяет наносить многокомпонентные покрытия путём испарения слитка из относительно легко испаряемых компонентов и распыления мишеней из тугоплавких компонентов. Ионы испаряемых металлов используются для распыления мишеней и воздействия на покрытие. Система апробирована в процессах вакуумного осаждения титана с добавками Al, V и Mo.

Введение

В машиностроении для изготовления деталей, подвергающихся сильным механическим, тепловым и химическим воздействиям используют различные многокомпонентные сплавы, содержащие в своём составе как относительно легко испаряемые (Ti, Zr, V, Al и др.) компоненты, так и тугоплавкие (Mo, W и др.) присадки. В качестве примера приведём сплавы состава Ti-8Al-1V-1Mo, Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo, Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo, из которых изготавливают лопатки вентиляторов газотурбинных двигателей. В процессе ремонта поверхности изношенных лопаток на неё надо наносить слой материала основы толщиной до 1-2 мм. Перспективным промышленным методом нанесения толстого покрытия с высокой адгезией и подходящей микроструктурой является электронно-лучевое испарение с бомбардировкой конденсата собственными ионами [1]. Однако возникает проблема согласованного испарения всех компонентов указанных сплавов, в первую очередь проблема испарения Al и Mo. Попытки подобрать подходящий режим испарения слитка, содержащего и Al, и Mo, как правило, не дают желаемого результата. В свою очередь, электронно-лучевое испарение из двух источников (слитков) разного состава не обеспечивает требуемой однородности и

воспроизводимости свойств покрытия в промышленных условиях.

Для решения данной проблемы было предложено применить испарительно-распылительную систему, в которой сочетается электронно-лучевое испарение одних компонентов наносимого покрытия с ионным распылением других; при этом в качестве источника распыляющих ионов используется металлическая плазма, создаваемая в потоке пара [2]. Плазма также используется как источник ионов, направляемых на подложку для осуществления ионного воздействия на осаждаемое покрытие. В настоящей работе исследуется подобная испарительно-распылительная система с паро-плазменным источником ионов.

Моделирование распыления Mo ионами Ti⁺

Для моделирования распыления молибдена ионами Ti⁺ была применена известная программа TRIM-95. Результаты расчётов приведены в табл. 1, где E_i – энергия ионов Ti⁺, S – коэффициент распыления атомов Mo, E_{Mo} – средняя энергия распылённых атомов Mo, R – коэффициент отражения ионов от мишени.

Таблица 1. Распыление Mo ионами Ti⁺

| $E_i, \text{эВ}$ | S | $E_{Mo}, \text{эВ}$ | R |
|------------------|-----|---------------------|------|
| 1000 | 1,2 | 77 | 0,12 |
| 2000 | 1,8 | 150 | 0,1 |
| 3000 | 2.0 | 200 | 0,09 |

Данные таблицы указывают на возможность эффективного распыления молибдена ионами титана. Энергию ионов (потенциал распыляемой мишени относительно плазмы) следует выбирать

в диапазоне 2-3 кэВ.

Экспериментальная установка

На рис. 1 приведена схема ионно-плазменной испарительно-распылительной электронно-лучевой установки [2]. В её нижней части находится водоохлаждаемый тигель, в который непрерывно подавался слиток из чистого титана или сплава Ti-8Al-1V-1Mo.

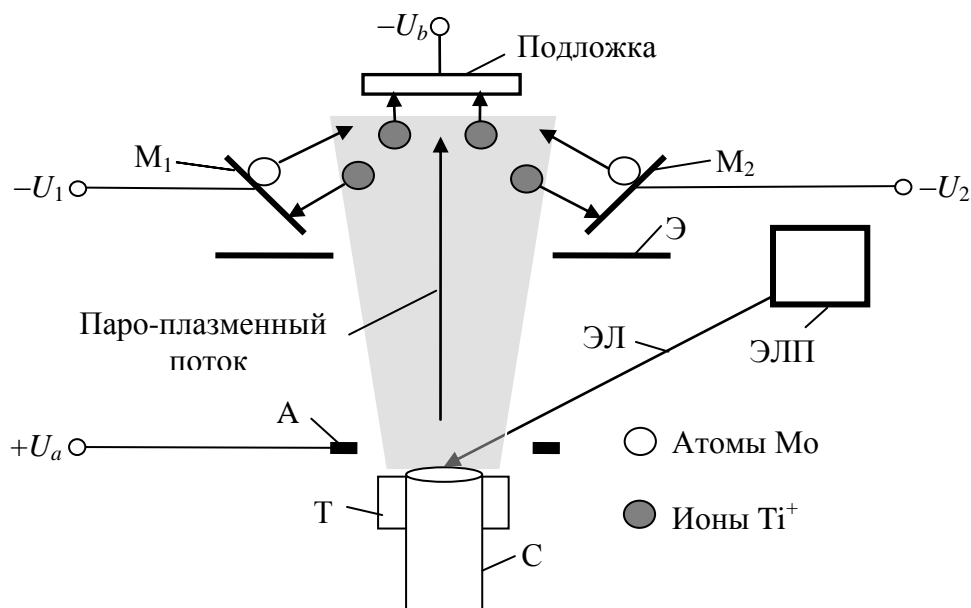


Рис. 1. Схема испарительно-распылительной установки. А – анод ионизирующего разряда дугового типа, M_1 и M_2 – мишени из распыляемого материала (Mo), С – слиток испаряемого материала, Т – водоохлаждаемый тигель, Э – экран, ЭЛ – электронный луч для испарения, ЭЛП – электронно-лучевая пушка

Над тиглем размещается кольцевой анод А для поддержания низковольтного разряда ($U_a = 8-10 \text{ В}$) дугового типа с током 100-200 А. Разряд (см. рис. 2) создавался в среде пара испаряемого материала слитка за счёт термоэмиссии поверхности расплава, нагреваемой электронным лучом ЭЛ [1]. Применялась термокатодная электронная пушка (ЭЛП), разработанная институтом электросварки им. Патона, её мощность составляла 40 кВт.



Рис. 2. Дуговой разряд над тиглем

Паро-плазменный поток распространялся вверх и достигал подложки, на которую подавались импульсы

напряжения отрицательного смещения с амплитудой $U_b = 0,5-2 \text{ кВ}$ (частота повторения импульсов – 1 кГц). Ионная бомбардировка конденсата ионами Ti^+

обеспечивала хорошую адгезию и плотную малодефектную структуру покрытия. При этом импульсный режим смещения подложки предотвращал дугообразование на её поверхности. При немодулированном (т.е. постоянном) напряжении смещении происходили периодические срывы в дуговой разряд, особенно частые в начальный период осаждения покрытия. В то же время имел место интенсивный ионный нагрев подложки (температура могла превышать 600°C), поэтому не требовался её дополнительный подогрев; более того приходилось уменьшать в процессе осаждения покрытия коэффициент заполнения импульсов D (с 0,9 до 0,1-0,3) для предотвращения перегрева.

Под подложкой размещаются одна или несколько мишеней M_1, M_2 . В данной работе они были из молибдена, но при необходимости их можно изготавливать из различных материалов. На мишени также подавались импульсы напряжения отрицательного смещения U_1, U_2 с амплитудой 2,5 кВ (частота повторения импульсов – 1 кГц, $D = 0,9$). Импульсный режим электрического питания мишеней использовался для предотвращения дугообразования на их поверхности. Если использовалась одна мишень, ей придавалась кольцевая

форма. Верхняя поверхность мишеней обращена к поверхности подложки, а нижняя поверхность мишеней защищена экраном Э от запыления испаряемым материалом. Поскольку в рабочей камере поддерживал вакуум порядка 10^{-3} Па, и паровой поток вблизи подложки практически не рассеивался, то одновременно экранировалась от запыления испаряемым материалом и верхняя поверхность мишеней.

Бомбардировка мишеней ионами Ti^+ приводила к распылению её поверхности и осаждению распылённых атомов на подложку. Химический элементный состав покрытия определялся с помощью микроанализатора “Самеса”.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Для определения эффекта легирования покрытия материалом, распылённым с поверхности мишени, был выполнен химический элементный анализ по всей толщине покрытия на образцах, полученных при испарении слитков из титана (рис. 3) и из сплава $Ti-8Al-1V-1Mo$ (рис. 4). Подложки были изготовлены из сплава $Ti-6Al-4V$.

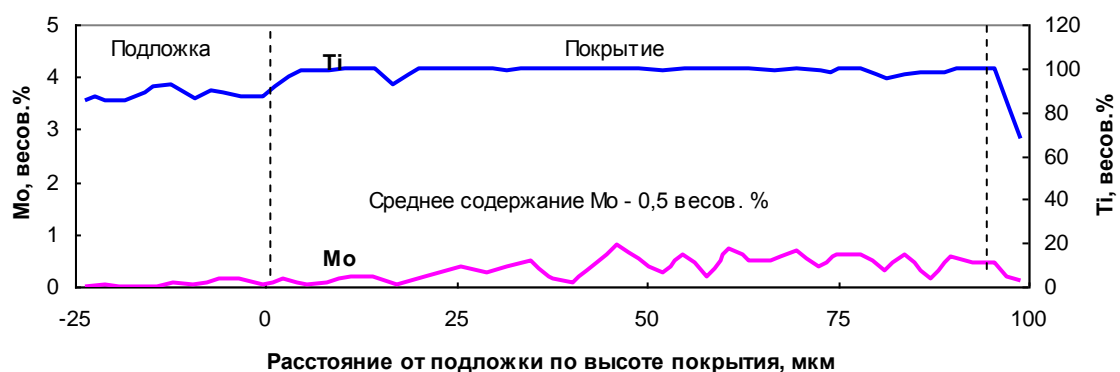


Рис. 3. Распределение Ti и Mo в покрытии при испарении слитка из чистого Ti . Ток ионизирующего разряда 110 А

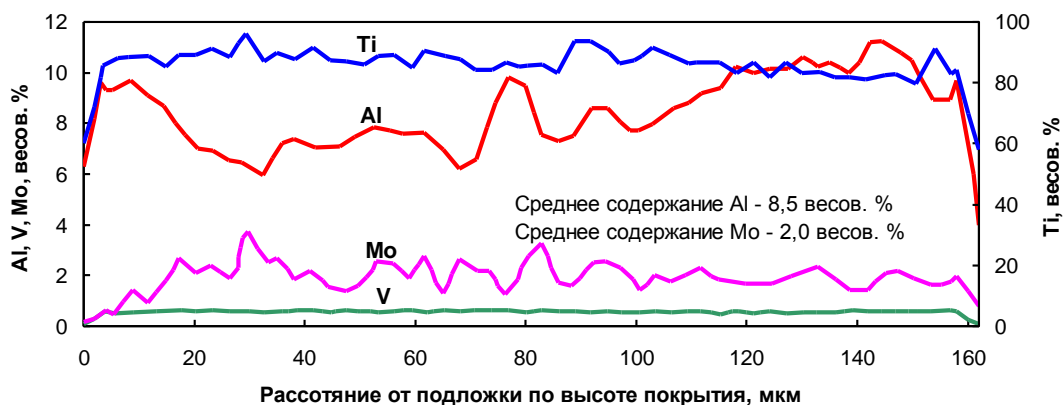


Рис. 4. Распределение химических элементов в покрытии при испарении слитка из сплава Ti-8Al-1V-1Mo. Ток ионизирующего разряда 140 А

Полученные экспериментальные данные подтверждают возможность легирования материала покрытия за счёт осаждения на подложку материала, распылённого с поверхности мишеней при бомбардировке их ионами испаряемого материала. Изменение тока ионизирующего разряда (в нашем случае со 110 до 140 А, см. рис. 3 и рис. 4) приводит к вполне очевидному результату – повышению содержания Mo в покрытии (от 0,5 до 2 весов.%) за счёт большей плотности тока ионов, распыляющих мишень. Измерения с помощью коллектора ионов, размещённого в области мишень-подложка, показали, что при указанных токах ионизирующего разряда плотность тока ионов, отбираемых из пароплазменного потока, составляла несколько миллиампер на квадратный сантиметр.

Диаграммы, приведенные на рис. 3 и рис. 4, свидетельствуют о том, что в процессах нанесения покрытий (их длительность составляла около 20 мин) не происходило запыление рабочей поверхности мишеней испарённым металлом. Это можно объяснить как эффективной экранировкой мишеней (теневым эффектом), так и ионным распылением возможного конденсата.

Заключение

Показана возможность применения электронно-лучевой испарительно-распылительной системы с пароплазменным источником ионов металлов для нанесения многокомпонентных покрытий за счёт испарения слитка из относительно легко испаряемых компонентов и распыления мишеней из тугоплавких компонентов. При этом ионы испаряемых металлов могут использоваться как для распыления мишеней, так и для воздействия на покрытие с целью управления их свойствами, в частности, повышения адгезии и плотности микроструктуры.

Список литературы

- [1]. Белевский В.П., Кузьмичев А.И. Методы термоионного осаждения для нанесения металлических покрытий. Киев: Об-во "Знание" Украинской ССР, 1984. 22 с.
- [2]. Белоусов И.В., Бибер В.И., Кузьмичев А.И., Меммен Р.Л. Способ и устройство для нанесения материала покрытия на деталь. Патент Украины 82852. Оpubл. 26.05.2008 (Приоритет США от 19.03.2004). МКИ: С23С 14/14 (на украинском языке).