

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.

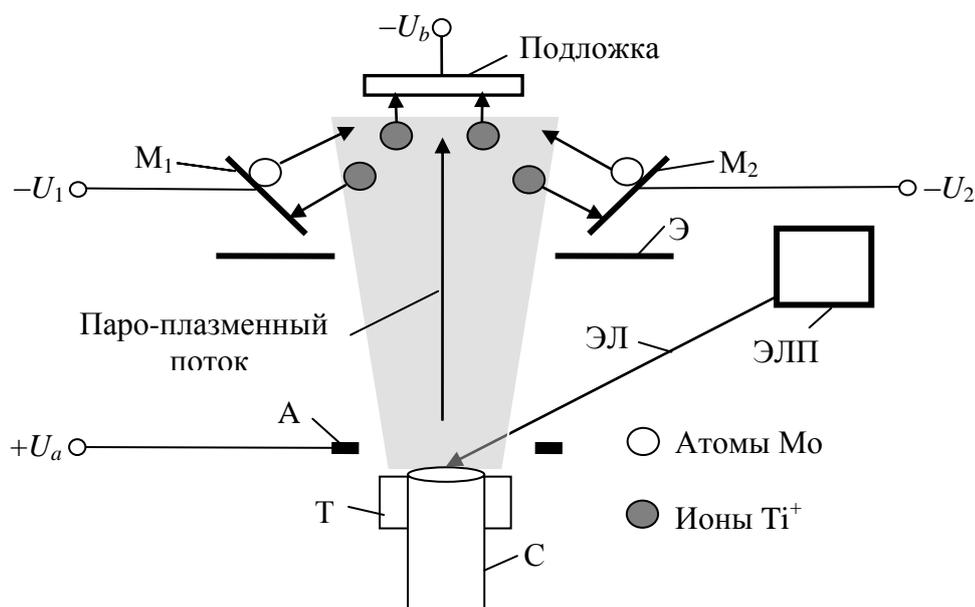


Рис. 1. Схема испарительно-распылительной установки. А – анод ионизирующего разряда дугового типа, M_1 и M_2 – мишени из расплавленного материала (Mo), С – слиток испаряемого материала, Т – водоохлаждаемый тигель, Э – экран, ЭЛ – электронный луч для испарения, ЭЛП – электронно-лучевая пушка

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 \mathcal{E} 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 $Ti-6Al-4V$.

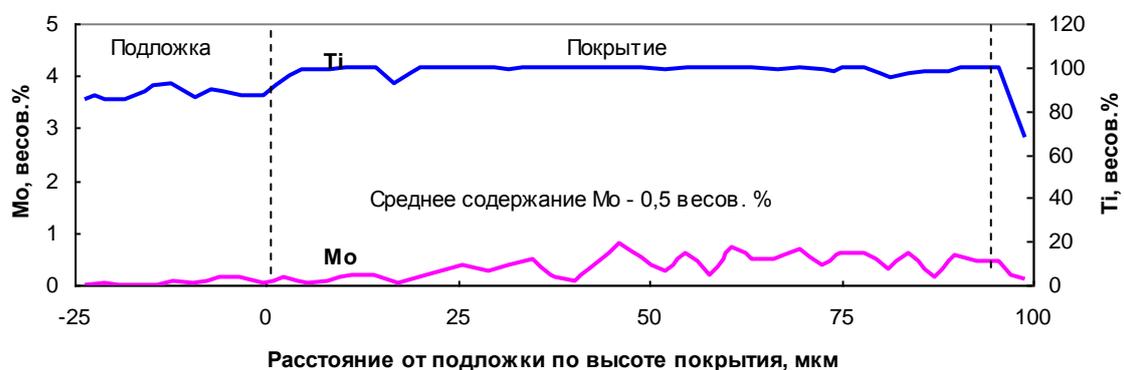


Рис. 3. Распределение Ti и Mo в покрытии при испарении слитка из чистого Ti . Ток ионизирующего разряда 110 А

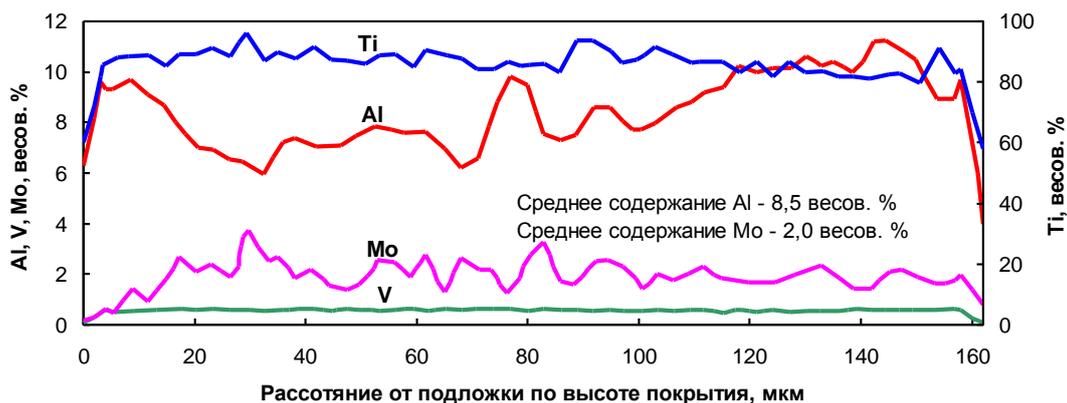


Рис. 4. Распределение химических элементов в покрытии при испарении слитка из сплава Ti-8Al-1V-1Mo. Ток ионизирующего разряда 140 А

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 вес.%) 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).