

## ГИБРИДНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО ИСПАРЕНИЯ И ИОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ\*

А.И. Кузьмичев<sup>1</sup>, А.И. Устинов<sup>2</sup>, А.Э. Руденко<sup>2</sup>, И.М. Дрозд<sup>1</sup>

<sup>1</sup>НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского». 03056, г. Киев, просп. Победы, 37. E-mail: kuzmichev-kpi@ukr.net  
<sup>2</sup>ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Рассмотрены гибридные системы для электронно-лучевого испарения с ионным ассистированием процесса конденсации испаренного вещества в виде покрытия. Представлена система, в которой ионы аргона генерировались с помощью магнетронного разряда, создаваемого вокруг стержнеобразной подложки, служащей катодом этого разряда. Цель ионного ассистирования — распыление поверхности подложки для финишной очистки перед нанесением покрытия и бомбардировка ионами конденсата во время осаждения для ионно-кинетического воздействия на структуру покрытия. Реализован процесс нанесения демпфирующего покрытия MgO–Cr–Sn на титановую подложку методом электронно-лучевого испарения с ассистированием ионами аргона подложки в условиях относительно низких температур (200 °С). Библиогр. 8, рис. 9.

*Ключевые слова:* электронно-лучевое испарение; ионы; ассистирование; бомбардировка; магнетронный разряд; демпфирующие покрытия; конденсат; осаждение; подложка

Нанесение покрытий на изделия широко применяется в промышленности с целью расширения функциональных характеристик конструкционных материалов. Покрытия защищают изделия от коррозии, повышают их жаростойкость, улучшают механические и электрические характеристики, облегчают проведение процессов пайки и сварки. Среди известных методов нанесения покрытий особое место занимает технология электронно-лучевого испарения (ЭЛИ) исходного материала в вакууме в силу присущих ей преимуществ [1, 2]. Однако она является чисто термическим процессом и не всегда позволяет получать желаемые результаты, например, по допустимому тепловому воздействию на подложку, требуемой микроструктуре покрытия, адгезии и т. д. Ионное ассистирование в рамках технологии ЭЛИ позволяет решить многие проблемы благодаря использованию эффектов, имеющих место при ионной бомбардировке поверхности твердого тела, из которых наиболее часто используются кинетические эффекты ионного распыления и модификации микроструктуры наносимого покрытия [1–5].

В данной работе рассматриваются: характеристики и потенциал процессов осаждения покрытий с ионным ассистированием; структурные схемы возможных гибридных систем ЭЛИ; система, содержащая электронно-лучевой испаритель и магнетронное разрядное устройство для генера-

ции ионов, бомбардирующих подложку; представлены результаты испытаний подобной системы при нанесении демпфирующего покрытия на титановую подложку при относительно низких температурах (порядка 200 °С).

**Характеристики и потенциал процессов осаждения покрытий с ионным ассистированием.** Для сравнения различных подходов к технологии нанесения покрытий в условиях, характерных для ЭЛИ, и оценки их возможностей целесообразно использовать энергетические диаграммы, показывающие диапазоны энергий частиц, участвующих в процессах получения покрытий. Подобная диаграмма показана на рис. 1. Она построена на основании анализа данных, опубликованных в мировой научно-технической литературе.

Диаграммы (рис. 1, секция I) показывают, что для технологии ЭЛИ с удельной мощностью луча  $P_{\text{ул}} \ll P_{\text{кр}}$  ( $10^6$  Вт/см<sup>2</sup>) и без использования ионных (плазменных, газоразрядных) эффектов характерна низкая энергия испаренных частиц (до 0,1 эВ), которая ниже или только вблизи порога многих процессов, важных для формирования качественного покрытия (устойчивой адсорбции осаждающихся частиц, десорбции примесей, перемешивания поверхностных атомов и т. д., см. секцию III). Соответственно, ЭЛИ при невысокой температуре подложек приводит к низкой плотности покрытий, их чувствительности к внешней среде, недо-

\*По материалам доклада, представленного на IX Международной конференции «Лучевые технологии в сварке и обработке материалов», 9–13 сентября 2019 г., г. Одесса, Украина.

А.И. Кузьмичев — <https://orcid.org/0000-0003-0087-275X>; А.И. Устинов — <https://orcid.org/0000-0002-8855-3499>;  
 И.М. Дрозд — <https://orcid.org/0000-0001-5152-1787>



Рис. 1. Энергетические диаграммы процессов при осаждении покрытий методами физического (PVD) и химического (CVD) осаждения с паровой фазы: I — энергия частиц, генерируемых в камерах осаждения около источника наносимого вещества; II — энергия частиц, воздействующих на подложки и конденсат в различных методах осаждения и дополнительной обработки; III — энергетические характеристики некоторых базовых процессов на поверхности подложек; IV — энергетические характеристики внешнего ионного луча и электрического воздействия на ионы из плазмы

статочной адгезии и не самым лучшим эксплуатационным свойствам. Поэтому в традиционной технологии ЭЛИ применяют высокотемпературный нагрев подложек (что не всегда допустимо) для повышения качества покрытий и усиления реактивности газов в случае покрытий сложного состава.

В 1937 г. Б. Бергхауз, а более обстоятельно через 27 лет Д. Мэттокс предложили сочетать испарительную технологию осаждения покрытий с бомбардировкой ионами из плазмы газового разряда, окружающей подложку [3, 4]. Эта технология имеет много названий и модификаций: ионное осаждение или Ion Plating (по аналогии с гальваническим осаждением при подаче отрицательного напряжения на металлическую подложку), конденсация с ионной бомбардировкой, термоионное осаждение, осаждение с ионным ассистированием или Ion Assisted Deposition, осаждение с ионным усилением или Ion Enhanced Deposition и т.д. Для ионного ассистирования процесса формирования покрытия, как правило, требуется энергия ионов, бомбардирующих подложку, больше 10 эВ, а на практике — десятки-сотни, иногда тысячи электрон-вольт (рис. 1, секция II).

Напряжение автосмещения подложки, окруженной плазмой, за счет ее зарядки плазменными электронами может быть недостаточным, по-

этому для ускорения ионов к подложке (образцу изделия) прикладывается внешнее напряжение отрицательного смещения (рис. 1, секция IV). Тогда получается многокомпонентный поток частиц, участвующих в процессе ионно-ассистированного осаждения (рис. 1, секция II), где одни частицы обладают низкой энергией (штриховая линия для частиц, полученных испарением или термическим разложением прекурсоров, а также для ионов, потерявших энергию при столкновениях с молекулами газа), а другие — это высокоэнергетичные ионы, ускоренные напряжением смещения подложки (сплошная линия).

Выполнять ионное ассистирование можно также с помощью ионной пушки, т. е. внешнего ионного источника, формирующего ионный луч (рис. 1, секция IV) и направляющего его на подложку, на которой одновременно конденсируются испаренные частицы. В этом случае испарительная технология ЭЛИ комбинируется с ионно-лучевой. Это есть так называемая Ion Beam Assisted Technology. Энергия ионов в этом случае задается ускоряющим напряжением внутри пушки.

Диаграммы в секциях II и III на рис. 1 показывают, что ионная бомбардировка подложек может применяться для ионной очистки поверхности подложек, ионного травления их материала, эффектов перемешивания поверхностных атомов осажден-

ного материала и вещества подложки, субповерхностной имплантации ионов каких-либо веществ в тело подложки для легирования и т. д.

**Структурные схемы гибридных систем ЭЛИ.** Структурные схемы современных гибридных систем ЭЛИ для осаждения покрытий, известных из мировой научно-технической литературы приведены на рис. 2.

*Основные особенности этих систем.* Во-первых, на подложки обычно подают напряжение отрицательного смещения  $U_s$  с целью ускорения бомбардирующей подложку ионов и получения эффекта ионного ассистирования. Но в случае применения автономной ионной пушки (рис. 2, *e*) с внутренним ускорением ионов, источник  $U_s$  можно не применять. Во-вторых, используют газ, как ионно-образующую среду, либо инертный для ионной очистки и модификации микроструктуры конденсата, либо реакционный ( $O_2$ ,  $N_2$ ,  $C_2H_2$ ,  $CH_4$  и др.) для нанесения покрытий сложного состава. Газ ионизируют различными способами (рис. 2, *a–з*): электронным лучом испарителя или в тлеющем

разряде с подложкой, служащей катодом (*a*); в ВЧ или СВЧ разряде (*б*); в разряде постоянного тока с тиглем, служащим катодом (*в*); с помощью отдельного электронного источника (*г*); в автономном газоразрядном устройстве, как правило с ВЧ индуктором, которое работает как инжектор ионно-плазменного потока (*д*); в ионной пушке (*e*); в газоразрядной электронной пушке испарителя (*ж*); в газовом разряде в частично изолированном объеме, в котором размещена подложка (*з*). Отметим, что в системах *б–г* можно осуществлять безгазовое ионное ассистирование за счет ионизации пара, т. е. ассистирование собственными ионами, если испаритель обеспечивает достаточную плотность пара. Такой подход позволяет минимизировать примеси в покрытиях и даже получать эпитаксиальные структуры, т. е. осуществлять процессы эпитаксии с ионным ассистированием. В системе с газоразрядной пушкой (рис. 2, *ж*) последняя может генерировать не только ускоренный электронный луч для испарения исходного материала из тигля, но и другие частицы на выходе из луче-

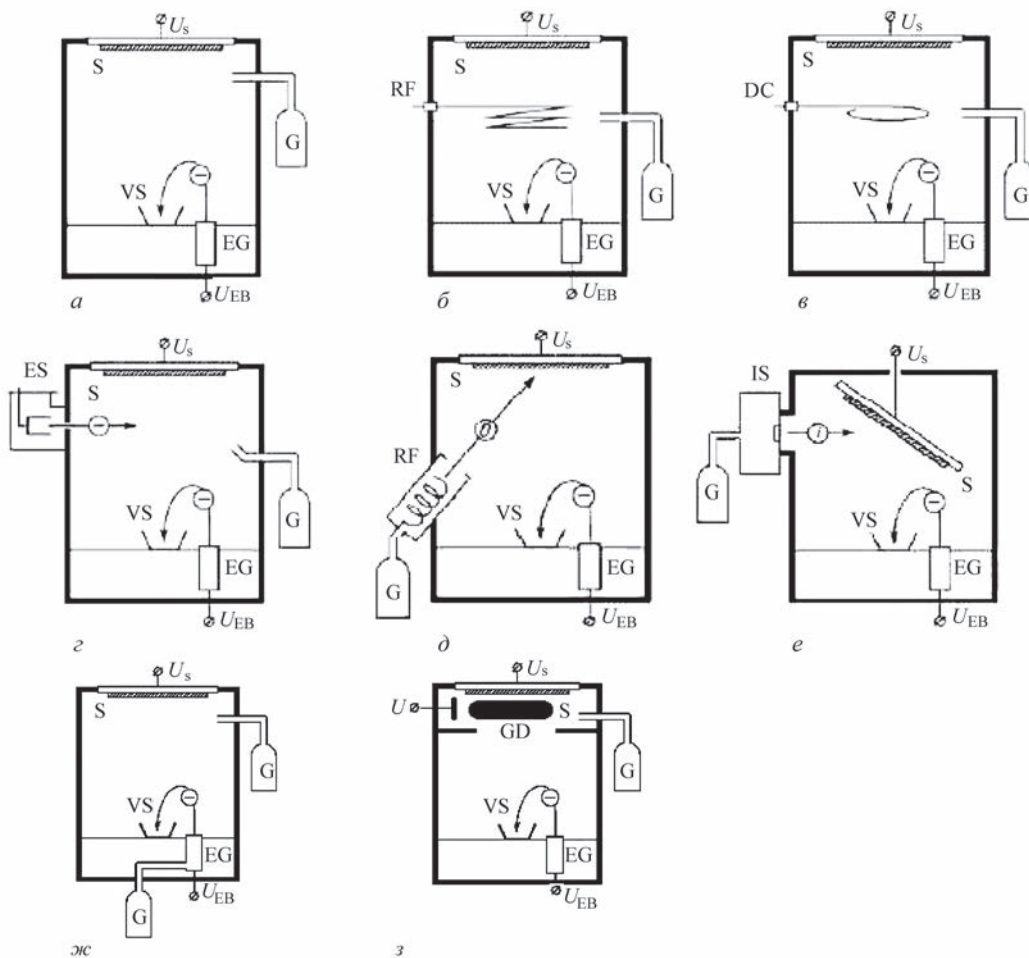


Рис. 2. Структурные схемы современных гибридных систем ЭЛИ: EG — электронная пушка; ES — источник электронов; S — подложка; IS — ионный источник/пушка; G — газ; GD — газовый разряд в квазизамкнутом объеме; VS — испаритель; DC — постоянное напряжение; RF — ВЧ напряжение;  $U$  — напряжение поддержания ионизирующего разряда;  $U_{EB}$  — ускоряющее напряжение электронной пушки;  $U_s$  — напряжение отрицательного смещения подложки

провода (химически активные атомные частицы, образованные в газовом разряде внутри пушки, а также положительные ионы при переполосовке напряжения на пушке) [6].

Представленные на рис. 2 системы ЭЛИ можно разделить на 2 группы:  $a-z$  — открытого типа с генерацией ионов непосредственно в камере осаждения покрытия;  $d-z$  — с генерацией ионов в изолированном или квазизамкнутом объеме. Подобное разделение систем ЭЛИ иллюстрирует способы решения проблемы согласования высоковакуумных условий, которые нужны для нормальной работы электронных пушек с термокатодом и транспортировки электронного луча к тиглю, и газовых условий, необходимых для генерации ионов.

Система, показанная на рис. 2,  $a$ , требует наиболее высокого давления рабочего газа ( $>1$  Па) для генерации ионного потока с плотностью более  $1 \text{ mA/cm}^2$ . Это объясняется прямолинейными траекториями электронов, их быстрым уходом из объема камеры и малой вероятностью ионизации газа при низком давлении. В системах, показанных на рис. 2,  $b-z$ , используются более эффективные способы поддержания ионизирующих разрядов:  $b$  — осцилляция электронов в ВЧ поле;  $v, z$  — большой ток эмиссии электронов из нагретой поверхности в тигле или внешнего источника, соответственно. При этом напряжение для ускорения электронов выбирают порядка  $20 \dots 200 \text{ В}$  для эффективной ионизации газа. В результате в указанных системах давление газа в камере обычно не превышает  $0,1$  Па.

В системах, показанных на рис. 2,  $d-z$ , соотношение давлений газа в газоразрядных устройствах для генерации ионов и камерах осаждения оптимизировано с учетом всех обстоятельств, при этом в камерах осаждения оно обычно составляет до  $0,01$  Па.

*Вопросы организации электрического питания гибридных систем.* Электрическое питание узлов электронного испарителя описано в литературе, является вполне стандартным и хорошо известно специалистам [1]. Важный вопрос — это выбор электрического питания узлов ионной части. Обычно применяют питание напряжением постоянного тока с использованием различных систем защиты от перегрузок и дугоподавления из-за возможных случаев дугообразования на элементах систем и подложках. В случае диэлектрической или плохо проводящей подложки на нее подают напряжение высокой частоты. Как правило используют частоту величиной  $13,56 \text{ МГц}$ , на которой благодаря вентильному эффекту формируется отрицательное напряжение смещения подложки и отсутствует дугообразование на ней. В последнее

время при работе с металлическими подложками все более широко применяют импульсное питание на средних частотах (десятки-сотни килогерц), которое более безопасно и экономично по сравнению с ВЧ питанием. Пример подобного подхода описан в работе [7], где предлагается импульсно модулировать питание всех узлов ионной части с практически полным подавлением дугообразования и легкостью регулирования параметров ионного ассистирования.

В настоящей работе для экспериментальной апробации гибридной схемы выбрана система ЭЛИ, представленная на рис. 2,  $z$ , в которой для генерации ионов используется газовый разряд GD в частично изолированном объеме. В этом же объеме размещается подложка, с которой непосредственно контактирует плазма ионизирующего разряда GD. Данная система выбрана из-за удобства ее применения для нанесения покрытий на длинномерные стержнеобразные подложки, используемые для проведения вибрационных испытаний. Далее эта система рассмотрена более детально и представлены результаты ее испытаний.

**Экспериментальная гибридная система ЭЛИ и результаты ее испытаний.** Структура экспериментальной системы представлена на рис. 3. Она создана на базе установки УЭ-204 с непрерывной откачкой рабочей камеры и стандартной электронной пушки с термокатодом. В рабочей камере установки размещена электродная система узла подложки, которая представляет собой цилиндрический нормальный газометрон [8] с внешним трубчатым анодом (1) и внутренним катодом (5), который также является подложкой. В анодную полость подается аргон. Снаружи анода расположены магниты (2), создающие осевое магнитное поле. Ортогональная ориентация магнитного поля относительно электрического около подложки создает условия для поддержания разряда при очень низком давлении (менее  $0,1$  Па) и высокой плотности ионного тока ( $j$ ) из плазмы разряда (4) на подложку (5). Это является следствием того, что магнитное поле эффективно удерживает электроны в межэлектродном промежутке, существенно удлиняя их траектории, при этом только благодаря многочисленным столкновениям электронов с молекулами газа они могут попасть на анод. Плазма газометронного разряда (4) окружает рабочую часть подложки, на которой осаждается покрытие. Размер рабочей части подложки определяется отверстием в аноде, через которое пар (7) из электронного испарителя попадает на вращающуюся подложку. Плотность разрядного тока ( $j$ ) может составлять десятки-сот-



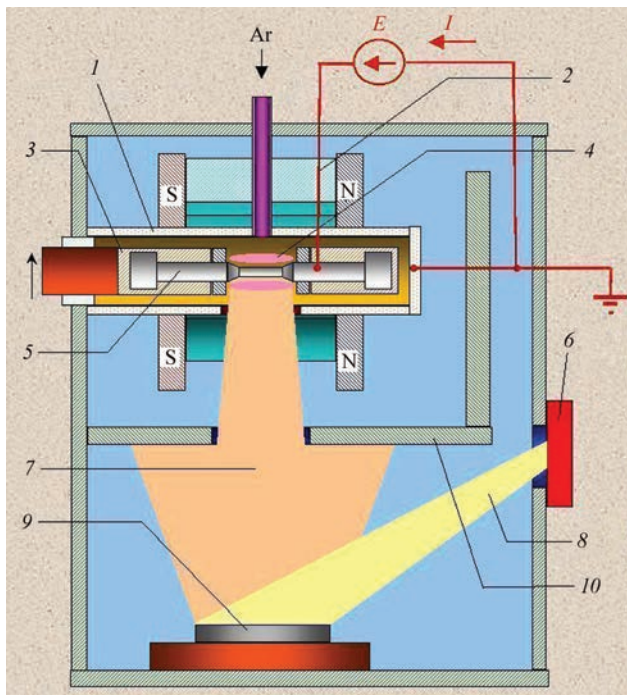


Рис. 3. Схема экспериментальной гибридной системы ЭЛИ: 1 — анод магнетронного разряда; 2 — постоянный магнит; 3 — вращающийся держатель катода (подложки); 4 — плазма магнетронного разряда; 5 — катод (подложка); 6 — электронная пушка; 7 — поток пара; 8 — электронный луч; 9 — таблетка испаряемого материала; 10 — стальной экран

ни миллиампер на квадратный сантиметр при разрядном напряжении 300...500 В. Режим питания разряда осуществляется постоянным током или импульсным с повышенной устойчивостью против дугообразования на катоде-подложке.

В целом узел подложки представляет собой квазизамкнутый объем, определяемый внутренним объемом трубчатого анода, а это снижает утечку аргона из полости анода и обеспечивает перепад давления, необходимый для нормальной

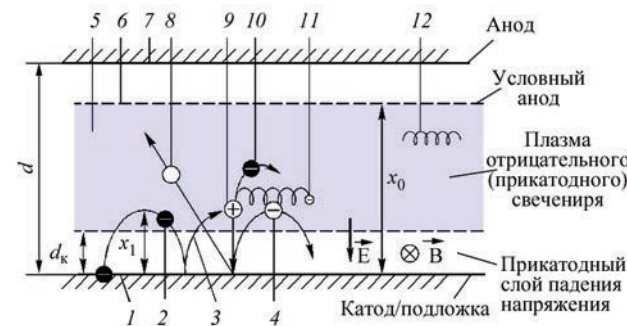


Рис. 4. Схема физических процессов в газомagnetроне: 1 — катод; 2 — первый катодный электрон; 3 — траектория катодного электрона; 4 — второй электрон, эмитированный катодом; 5 — слой плазмы отрицательного свечения; 6 — верхняя граница плазмы; 7 — анод; 8 — распыленный атом материала катода; 9 — ион, образованный при ионизации молекулы газа; 10 — первый катодный электрон после столкновения с молекулой газа; 11 — вторичный электрон, образованный при ионизации молекулы газа; 12 — траектория плазменного электрона

работы электронного испарителя. Для минимизации влияния магнитного поля на траекторию электронного луча (8) и дополнительного уменьшения вытекания аргона в зону работы испарителя введен стальной экран (10).

Выбор геометрии электродной системы узла подложки выполнен с учетом физики газомagnetронного разряда. На рис. 4 приведена упрощенная схема процессов в межэлектродном промежутке газомagnetрона. Основные разрядные процессы — ионизация газа и вторичная ионно-электронная эмиссия катода. При этом ионизация газа в основном осуществляется вторичными катодными электронами [8]. Величина  $x_0$  определяет расстояние от катода, на котором катодные электроны теряют почти всю свою энергию на ионизацию.

Величину  $d$  для промежутка от подложки (катода) до анода следует выбирать из условия  $d \geq x_0$ . С учетом того, что траектории катодных электронов близки к циклоидальным, а величина  $x_0$  в несколько раз больше высоты циклоиды  $x_1$  для электронов, величину индукции магнитного поля выбираем из условия

$$B = \frac{1}{x_1} \sqrt{\frac{2m}{e} U} \approx \frac{(2 \dots 5)}{d} \sqrt{\frac{2m}{e} U},$$

где  $e$  и  $m$  — заряд и масса электрона соответственно, а  $U$  — разрядное напряжение. Плотность ионного тока на катоде  $j_i$  (практически равная плотности разрядного тока  $j$ ), толщина ионного слоя около катода  $d_k$  и напряжение  $U$  связаны известным уравнением Чайльда-Ленгмюра (или законом «степени 3/2»):

$$j_i = 5,46 \cdot 10^{-6} \frac{U^{3/2}}{\sqrt{M d_k^2}},$$

где  $j_i \approx j$ ,  $M$  — молекулярная масса иона.

Величина  $d_k$  должна быть меньше длины свободного пробега ионов в рабочем газе, чтобы они не теряли свою энергию из-за столкновений с молекулами газа. Также величина  $d_k$  должна составлять малую долю от  $x_0$ , чтобы не увеличивать межэлектродный промежуток  $d$ . На практике целесообразно выбирать величину  $d = 10 \dots 20$  мм, давление аргона в зоне разряда  $0,05 \dots 0,5$  Па,  $B = 0,03 \dots 0,06$  Т,  $U = 300 \dots 500$  В. Типичные значения плотности разрядного тока  $j$  составляют единицы-десятки мА/см<sup>2</sup>. Величина  $j$  выбирается исходя из требования к технологии и допустимого нагрева подложки. Применение импульсного режима ионной бомбардировки, как правило, позволяет получать нужный технологический результат без перегрева подложки при большой величине  $j$ .

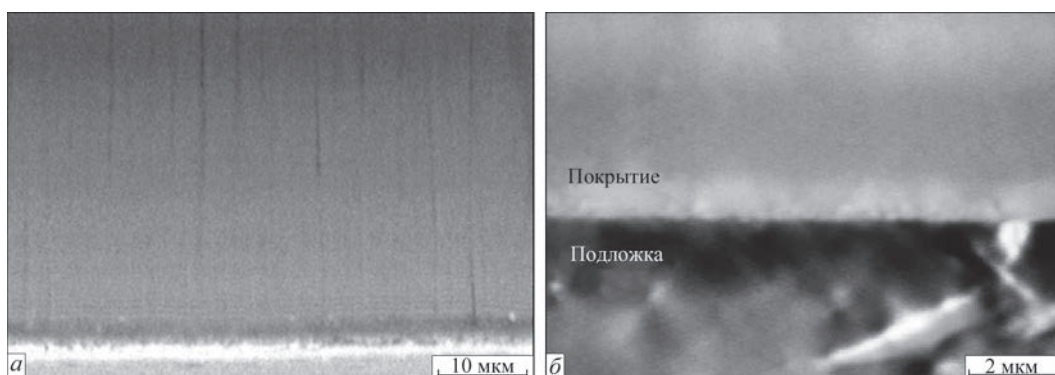


Рис. 5. Микроструктура вблизи границы титановая подложка–покрытие MgO–Cr–Sn (а, б — см. в тексте)

Технологическую апробацию рассмотренной гибридной системы осуществляли при осаждении покрытий MgO–Cr–Sn на подложку из титанового сплава ВТ6 при температуре ниже 400 °С. Эти условия осаждения обусловлены необходимостью сохранения структурно-фазового состояния сплава, сформировавшегося в процессе его термомеханической обработки, связанной с изготовлением лопаток компрессора газотурбинных двигателей. Повышение надежности и долговечности их эксплуатации связывается с подавлением резонансных колебаний, которые могут возникать в лопатках. Одним из путей решения этой задачи является осаждение высокодемпфирующих покрытий на их поверхность. Получение таких покрытий на поверхности титанового сплава при температуре ниже 400 °С традиционными методами усложняется тем, что поверхность титанового сплава покрыта окисной пленкой, которая препятствует получению адгезии с покрытием. Известно, что при контакте TiO<sub>2</sub> с MgO и Cr могут образовываться хрупкие фазы, которые при знакопеременных деформациях будут приводить к образованию трещин на границе раздела покрытие–подложка. В связи с этим, для получения высокой адгезионной прочности покрытия и подложки ее поверхность перед осаждением необходимо очистить от оксидной пленки, а затем осадить покрытие с градиентной структурой. Как источник осаждаемого вещества использовали композиционную таблетку, состоящую из смеси порошков Sn, Cr и MgO, которую нагревали электронным лучом (см. поз. 9 на рис. 3). Мощность луча составляла 5...10 кВт, а магнетронного разряда — порядка 100 Вт.

При нагреве такой таблетки из нее вначале испаряется Sn и Cr, а затем в паровой поток поступает MgO. Для предотвращения появления жидкой фазы олова на поверхности подложки ее температура не должна превышать 200 °С. Скорость осаждения покрытия составляла 1...2 мкм/мин.

Эксперименты показали, что при отсутствии подачи аргона разряд в паре испаряемого веще-

ства не возникал, что свидетельствует о низкой плотности пара в области подложки (локальное давление пара меньше 0,01 Па). Отсюда следует вывод, что ионное ассистирование осуществляется главным образом ионами аргона, но вполне вероятно, что некоторая ионизация пара может происходить в плазме газоматронного разряда с последующей бомбардировкой конденсата собственными ионами. Уточнение этого момента требует отдельного исследования.

На рис. 5 представлены микроструктуры вблизи межфазной границы титановая подложка–покрытие MgO–Cr–Sn. Видно, что на границе раздела подложка–покрытие формируется светлая полоса, состоящая главным образом из хрома и олова (рис. 5, а, рис. 6). При большом увеличении (рис. 5, б) видно, что на границе раздела отсутствуют дефекты или несплошности, которые могут ухудшить прочность соединения подложки и покрытия. Плавное изменение концентрации в области интерфейса обеспечивает снижение локализации упругих напряжений в этой зоне, что способствует высокой прочности системы в целом (изгиб титановой пластины на 180° не приводит к отслоению покрытия от подложки).

На рис. 7 представлено темнопольное изображение микроструктуры покрытия на основе системы MgO–Cr–Sn, осажденное при температуре 200 °С. Как видно из результатов исследования микроструктуры, такие условия осаждения способствовали формированию нанокompозита со средним размером его составляющих (MgO, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SnO<sub>2</sub>) — 10 нм, что способствовало формированию структурного состояния с высоким уровнем микротвердости до 17 ГПа. Такой уровень микротвердости может обеспечить защиту поверхности лопатки от ее повреждений в газопылевом потоке.

Колебательные характеристики исследуемых образцов представлены на рис. 8, 9. Видно, что образец с покрытием характеризуется логарифмическим декрементом колебаний, который в 5...7 раз выше, чем логарифмический декремент колебаний такой

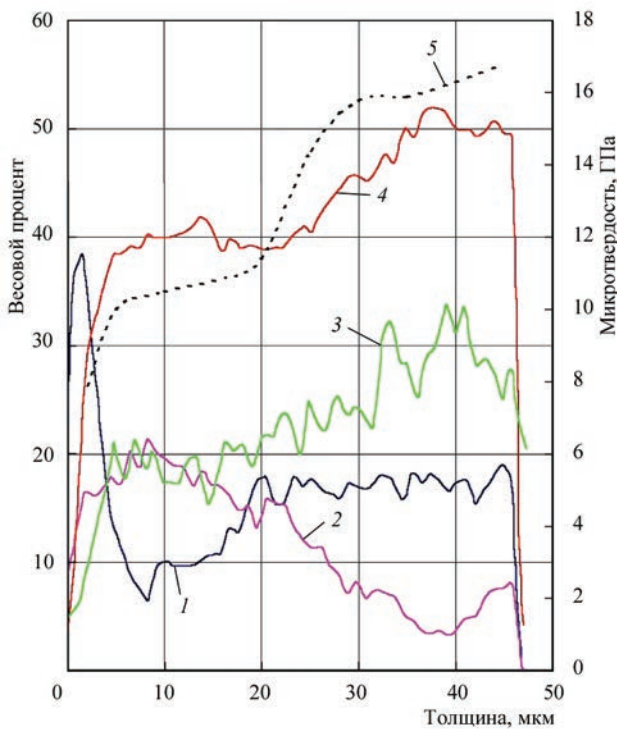


Рис. 6. Распределение химических элементов (1 — Cr; 2 — Sn; 3 — O; 4 — Mg) и микротвердости (5) по толщине покрытия MgO–Cr–Sn

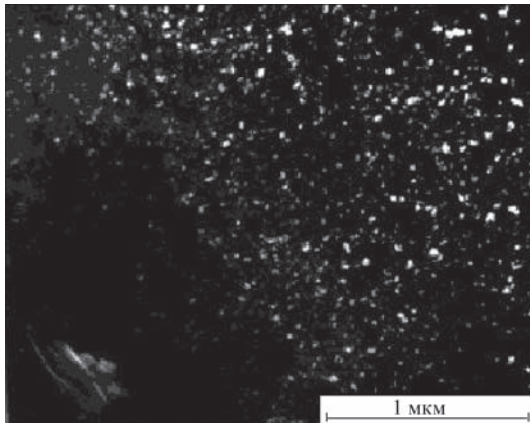


Рис. 7. Темнопольное изображение микроструктуры покрытия MgO–Cr–Sn

же титановой пластинки без покрытия. Как видно из рис. 9, такое повышение декремента колебания в образце с покрытием существенно влияет на амплитуду резонансных колебаний  $F_{рез}$ , снижая ее в 5 раз по сравнению с образцом без покрытия.

Предполагается, что такое поведение образцов обусловлено наноструктурированным состоянием материала покрытия, способствующего рассеиванию энергии упругих колебаний за счет большой плотности границ раздела.

Таким образом, электронно-лучевое вакуумное осаждение покрытий на титановые подложки в условиях ионной бомбардировки показало, что этот процесс позволяет не только подготовить

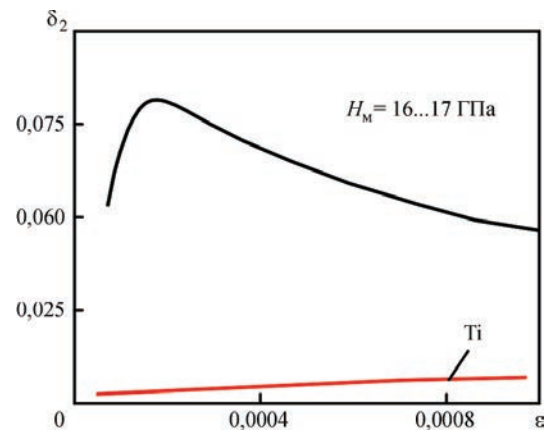


Рис. 8. Зависимость декремента колебаний материала покрытия MgO–Cr–Sn и титановой подложки ( $\delta_2$ ) от амплитуды их знакопеременной деформации в процессе колебаний ( $\epsilon$ )

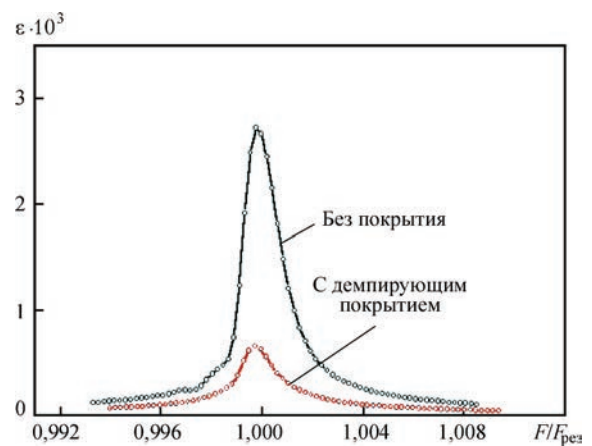


Рис. 9. Влияние демпфирующего покрытия MgO–Cr–Sn на амплитуду знакопеременной деформации ( $\epsilon$ ) титановой подложки при возбуждении в ней колебаний с частотой  $F$

поверхность подложки к осаждению путем ее очистки от загрязнения и оксидной пленки, но и оказывает влияние на формирование микроструктуры покрытия. В результате этого формируется покрытие на основе системы MgO–Cr–Sn с высоким уровнем адгезионной прочности в наноструктурированном состоянии, сочетающее высокую микротвердость и высокий уровень диссипации энергии колебаний.

## Выводы

1. Рассмотрены принципы построения гибридных систем для нанесения покрытий, включающих электронно-лучевые испарители и устройства для ионной обработки и ионного распыления. Обсуждены физические основания эффективности их работы и проблемы при их практической реализации.

2. Представлен и исследован вариант реализации гибридной системы, состоящий из электронно-лучевого испарителя исходного материала и газомagnetронного устройства для генерации



ионов с целью оказания ионного воздействия на подложку.

3. Показана ефективність применения подобной системы для нанесения покрытий на основе системы MgO–Cr–Sn на титановые подложки в условиях относительно низких температур (200 °C).

#### Список литературы

1. Шиллер З., Гайзинг У., Панцер З. (1980) *Электронно-лучевая технология*. Москва, Энергия.
2. Мовчан Б.А., Малашенко И.С. (1983) *Жаростойкие покрытия, осаждаемые в вакууме*. Киев, Наукова думка.
3. Белевский В. П., Кузьмичев А.И. (1984) *Методы термоионного осаждения для нанесения металлических покрытий*. Киев, Общество «Знание».
4. Bunshah R.F. (ed.) (1994) *Handbook of deposition technologies for films and coatings*. Noyes Publications.
5. Norwood J.A. (ed.) (2000) *Ionized physical vapor deposition*. Academic Press.
6. Кузьмичев А.И., Бабинов Н.А., Лисенков А.А. (2016) *Плазменные эмиттеры источников заряженных и нейтральных частиц*. Киев, Аверс.

7. Кузьмичев А.И., Цибульский Л.Ю. (2015) *Пристрій для нанесення покриттів у вакуумі з іонно-плазмовою активацією*. Україна, Пат. 101342.
8. Кузьмичев А.И. (2008) *Магнетронные распылительные системы*. Киев, Аверс.

#### References

1. Schiller, Z., Gaizing, U., Pantser, Z. (1980) *Electron beam technology*. Moscow, Energiya [in Russian].
2. Movchan, B.A., Malashenko, I.S. (1983) *Heat-resistant vacuum deposited coatings*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
3. Belevsky, V.P., Kuzmichev, A.I. (1984) *Methods of thermionic deposition for metallic coatings*. Kiev, Znanie [in Russian].
4. (1994) *Handbook of deposition technologies for films and coatings*. Ed. by Bunshah, R.F. Noyes Publications.
5. (2000) *Ionized physical vapor deposition*. Academic Press.
6. Kuzmichev, A.I., Babinov, N.A., Lisenkov, A.A. (2016) *Plasma emitters of sources of charged and neutral particles*. Kiev, Avers [in Russian].
7. Kuzmychev, A.I., Tsybul'skiy, L.Yu. (2015) *Device for vacuum coating deposition with ion-plasma activation*. Ukraine, Pat. 101342 [in Ukrainian].
8. Kuzmichev, A.I. (2008) *Magnetron spray systems*. Kiev, Avers [in Russian].

### ГІБРИДНІ СИСТЕМИ ДЛЯ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОГО ВИПАРОВУВАННЯ ТА ІОННОГО РОЗПИЛЕННЯ

А.І. Кузьмичев<sup>1</sup>, А.І. Устїнов<sup>2</sup>, О.Е. Руденко<sup>2</sup>, І.М. Дрозд<sup>1</sup>

<sup>1</sup>НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37. E-mail: kuzmichev-kpi@ukr.net  
<sup>2</sup>ІЗЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Мадевичв, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Розглянуто гібридні системи для електронно-променевого випаровування з іонним асистуванням процесу конденсації випарованої речовини у вигляді покриття. Представлена система, в якій іони аргону генерувалися за допомогою магнетронного розряду, створюваного навколо підкладки у вигляді стрижня, що служить катодом цього розряду. Мета іонного асистування — розпилення поверхні підкладки для фінішної очистки перед нанесенням покриття і бомбардування іонами конденсату під час осадження для іонно-кінетичної дії на структуру покриття. Реалізовано процес нанесення демпферного покриття MgO–Cr–Sn на титанову підкладку методом електронно-променевого випаровування з асистуванням іонами аргону підкладки в умовах відносно низьких температур (200 °C). Бібліогр. 8, рис. 9.

*Ключові слова:* електронно-променево випаровування; іони; асистування; бомбардування; магнетронний розряд; демпферуючі покриття; конденсат; осадження; підкладка

### HYBRID SYSTEMS FOR ELECTRON BEAM EVAPORATION AND ION SPUTTERING

A.I. Kuzmichev<sup>1</sup>, A.I. Ustinov<sup>2</sup>, A.E. Rudenko<sup>2</sup>, I.M. Drozd<sup>1</sup>

NTTU «Igor Sikorsky KPI». 37 Pobedi Prosp., 03506, Kyiv, Ukraine. E-mail: kuzmichev-kpi@ukr.net  
<sup>2</sup>E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.  
 11 Kazymyr Malevyeh Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

Hybrid systems for electron beam evaporation with ion-assisted process of evaporated substance condensation in the form of coating are considered. A system is presented, in which argon ions were generated by a magnetron discharge, induced around a rod-like substrate which served as a cathode for this discharge. The objective of ion assisting is sputtering of the substrate surface for finish cleaning before coating deposition and bombardment by condensate ions during deposition to provide an ion-kinetic impact on the coating structure. The process of deposition of damping MgO–Cr–Sn coating on titanium substrate was realized by applying the method of electron beam evaporation of the substrate with argon ion assisting under the conditions of relatively low temperatures (200 °C). Ref. 8, Fig. 9.

*Key words:* electron beam evaporation; ions; assisting; bombardment; magnetron discharge; damping coatings; condensate; deposition; substrate

Поступила в редакцію 30.10.2019