

УДК 621.793

DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2025_2_63_67

EDN: LRECBR

ПРИМЕНЕНИЕ СЕПАРИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ ВАКУУМНО-ДУГОВОГО РАЗРЯДА

С.Д. Латушкина, И.М. Романов, О.И. Посылкина, И.А. Сечко, В.М. Комаровская

Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск

APPLICATION OF SEPARATING DEVICES FOR FORMING MULTI-COMPONENT COATINGS FROM PLASMA FLOW OF VACUUM ARC DISCHARGE

S.D. Latushkina, I.M. Romanov, O.I. Posylkina, I.A. Sechko, V.M. Komarovskaya

Institute of Physics and Technology of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk

Аннотация. Предложена конструкция двухкатодного магнитоэлектрического фильтра для снижения гетерофазности плазменного потока при формировании многокомпонентных покрытий. Экспериментально исследовано влияние конфигурации магнитных полей сепаратора на пространственное распределение концентрации элементов в многокомпонентном плазменном потоке в вакуумной камере. Показано, что при использовании сепарирующей системы с Y-образным плазмодом управление соотношением элементов в осаждаемых покрытиях возможно в результате изменения расположения деталей в вакуумной камере и за счет асимметрии токов дугового разряда на испарителях.

Ключевые слова: вакуумно-дуговая плазма, гетерофазность плазменного потока, многокомпонентные покрытия, системы сепарации.

Для цитирования: Применение сепарирующих устройств для формирования многокомпонентных покрытий из плазменных потоков вакуумно-дугового разряда / С.Д. Латушкина, И.М. Романов, О.И. Посылкина, И.А. Сечко, В.М. Комаровская // Проблемы физики, математики и техники. – 2025. – № 2 (63). – С. 67–73. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2025_2_63_67 – EDN: LRECBR

Abstract. A design of a two-cathode magnetoelectric filter has been proposed to reduce the heterophase of the plasma flow during the formation of multicomponent coatings. The effect of the configuration of the magnetic fields of the separator on the spatial distribution of the concentration of elements in a multicomponent plasma flow in a vacuum chamber was experimentally studied. It is shown that when using a separating system with a Y-shaped plasma guide, the control of the ratio of elements in deposited coatings is possible as a result of changing the arrangement of the parts in the vacuum chamber and due to the asymmetry of arc discharge currents on the evaporators.

Keywords: vacuum arc plasma, heterophase of plasma flow, multi-component coatings, separation systems.

For citation: Application of separating devices for forming multi-component coatings from plasma flow of vacuum arc discharge / S.D. Latushkina, I.M. Romanov, O.I. Posylkina, I.A. Sechko, V.M. Komarovskaya // Problems of Physics, Mathematics and Technics. – 2025. – № 2 (63). – P. 67–73. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2025_2_63_67 (in Russian). – EDN: LRECBR

Введение

В последние годы многокомпонентные покрытия, формируемые вакуумно-плазменными методами, получили широкое распространение в качестве слоёв, обладающих высокими эксплуатационными свойствами, такими как износ- и коррозионная стойкость, сопротивление термическому окислению и другими [1]–[3]. В тоже время при осаждении покрытий сложного элементного состава возникают технологические вопросы, связанные с необходимостью получения однородной многокомпонентной плазмы. Можно выделить несколько направлений для создания многокомпонентной плазмы при вакуумно-плазменном осаждении [4]–[8]:

– применение мозаичных катодов (мишеней), состоящих из нескольких однокомпонентных частей;

– применение композиционных сплавных катодов (мишеней);

– одновременное испарение нескольких катодов (мишеней) различного элементного состава.

Применение мозаичных катодов (мишеней) часто приводит к технологическим проблемам при управлении составом формируемых покрытий из-за различных скоростей эрозии составных частей катода. В случае получения композиционных катодов (мишеней) сложно варьировать их элементный состав в широком интервале, так как традиционные методы получения (литье, СВС-синтез, порошковая металлургия) могут

быть реализованы в ограниченном диапазоне концентраций компонентов. Поэтому представляет интерес способ одновременного испарения нескольких катодов (мишеней) из чистых металлов, при котором конденсация покрытия происходит из потоков от нескольких источников, что существенно расширяет технологические возможности формирования покрытий различного состава.

Наличие микрокапельной фракции в плазменном потоке нарушает однородность наносимых покрытий и ухудшает их эксплуатационные характеристики. Известны различные подходы для решения проблемы снижения количества макрочастиц в плазменных потоках:

- 1) повышение скорости перемещения катодных пятен по рабочей поверхности катода [9];
- 2) использование кратковременного импульсного вакуумно-дугового разряда, приводящего к распаду катодного пятна на множество мелких катодных пятен, быстро перемещающихся по поверхности катода [10];
- 3) применение магнитной фокусировки плазменного потока [11];
- 4) использование магнитоэлектрических фильтров [12]–[14].

Применение магнитоэлектрических фильтров плазмы в процессах электродугового осаждения покрытий позволяет расширить технологические возможности метода для улучшения функциональных свойств покрытий за счёт снижения шероховатости их поверхности и дефектности. Однако применение таких систем при формировании многокомпонентных плазменных потоков остается малоизученным.

Цель работы – изучение особенностей транспортировки многокомпонентных плазменных потоков вакуумно-дугового разряда вдоль криволинейных магнитных полей сепарирующей магнитоэлектрической системы и разработка способов управления такими потоками плазмы с помощью магнитных полей и технологических параметров осаждения.

1 Методика эксперимента

В настоящей работе эксперименты проводились на установке УРМ 3.279.048 для вакуумно-дугового осаждения покрытий, оснащённой двухканальным Y-образным плазменным сепаратором, изготовленным из немагнитной стали 12Х18Н10Т. Эксперименты проводились при остаточном давлении в камере 10^{-3} Па.

Пространственное распределение элементов в плазменных потоках оценивали по относительной концентрации элементов в покрытиях на подложках из кремния, размещаемых в различных точках камеры.

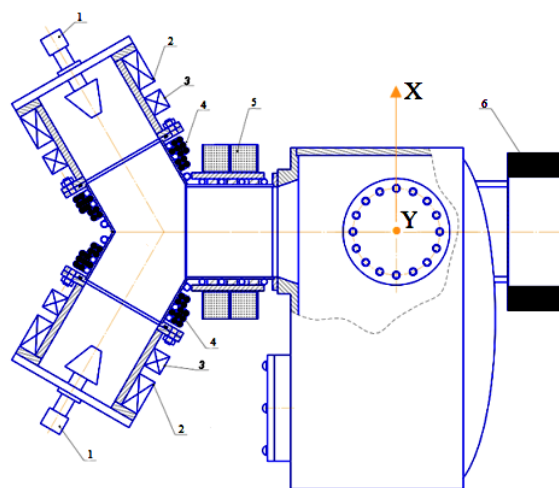
Элементный состав покрытий определяли электронным микронзондом JEOL JXA 8500-F. Анализ дефектности поверхности формируемых

многокомпонентных покрытий проводился с помощью металлографического комплекса на основе микроскопа Микро 200.

2 Результаты

Основной задачей сепарирующей системы является создание пространственного разделения движения компонентов плазмы (ионов, макрочастиц). Выбирая конструкцию сепарирующей магнитоэлектрической системы и конфигурацию магнитных полей в ней, необходимо добиться, чтобы на выход системы проходили только заряженные частицы плазменного потока, а нейтралы и макрочастицы двигались прямолинейно и оседали на внутренней поверхности плазмоведа.

Учитывая технологические возможности установки для вакуумно-дугового осаждения покрытий, был разработан и изготовлен двухканальный Y-образный плазменный фильтр (рисунок 2.1).



- 1 – дуговые испарители,
- 2 – стабилизирующие соленоиды,
- 3 – фокусирующие соленоиды,
- 4 – отклоняющий соленоид,
- 5 – транспортирующий соленоид,
- 6 – дополнительный соленоид

Рисунок 2.1 – Система для осаждения многокомпонентных покрытий с сепарацией плазменных потоков

В разработанном сепараторе два дуговых испарителя (1) расположены симметрично под углами 60° к оси общего плазменного потока для минимизации неоднородности азимутального распределения плотности плазменного потока при сохранении функции удаления макрочастиц.

Конфигурация магнитного поля в сепараторе задавалась системой катушек (2–6). Катушки (2) обеспечивали стабилизацию горения дуги, фокусировку плазменного потока, вылетающего с катода, задавали катушки (3), увеличивая его плотность по оси, не снижая при этом стабильность дугового разряда.

При помощи катушки (4) происходило разделение траекторий движения нейтральных частиц и металлической плазмы, что приводило к удалению из плазменного потока значительной части нейтральных макрочастиц. Катушки (5) должны были обеспечивать транспортировку плазменного потока к выходу из фильтра, в то же время позволяя потокам плазмы частично перемешиваться вследствие взаимной диффузии поперек слабого магнитного поля.

Анализ исследований по эффективности транспортировки плазмы вдоль криволинейных магнитных полей показал, что можно выделить несколько основных положений для обеспечения эффективной работы магнитоэлектрического фильтра [16]:

- магнитное поле со стороны электрода для удержания катодного пятна на торце катода и предотвращения его перемещения на боковую поверхность должно быть сильнее, чем со стороны анода;
- фокусировка плазмы не должна снижать уровень стабильности дугового разряда;
- создание магнитных полей внутри фильтра с минимальным перепадом интенсивностей;
- создаваемое магнитное поле в транспортирующем канале должно иметь высокую напряжённость возле стенок плазмоведа и практически нулевую в его центре, что обеспечит беспрепятственное перемещение частиц плазмы поперек оси плазмоведа, способствуя их эффективному перемешиванию.

Исходя из выше приведённых положений, разрабатывалась конфигурация электромагнитных полей в плазменном фильтре за счёт использования соленоидов (2)–(5), размещённых по ходу движения плазмы.

В настоящей работе при изучении работы двухкатодного магнитоэлектрического фильтра при вакуумно-дуговом осаждении в качестве плазмообразующих были использованы металлы с различными физико-химическими свойствами (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Физико-химические свойства плазмообразующих металлов

Металл	Масса атома, а.е.м.	Температура плавления, °C	Температура кипения, °C	Энергия ионизации, эВ
Титан	47,867	1943	3287	6,82
Цирконий	91,224	1855	4377	6,84
Хром	51,996	1907	2671	6,76
Алюминий	26,9815	660	2518	5,98
Медь	63,546	1083	2567	7,72

Значения силы тока на стабилизирующих (2) и фокусирующих соленоидах (3) были выбраны

эмпирически, исходя из условий обеспечения надёжного поджига дугового разряда в источниках, стабильного горения катодного пятна на рабочем торце катода и равномерной эрозии последнего. Как показали эксперименты, данные величины существенным образом зависят от материала катода (таблица 2.2).

Таблица 2.2 – Технологические параметры магнитной системы для плазмообразующих металлов

Материал испарителя	Сила тока на соленоиде (2), А	Сила тока на соленоиде (3), А
Ti	0,9–1,1	0,7–0,8
Zr	1–1,2	0,9–1,0
Cr	0,8–0,9	0,8–0,9
Al	0,6–0,7	1–1,1
Cu	0,9–1	1,3–1,5

Выбранные параметры обеспечивали фокусировку плазменного потока каждого из двух дуговых испарителей, уменьшая потерю ионной составляющей на стенках камеры (анода).

Было изучено влияние силы тока на транспортирующем соленоиде (5) на пропускную способность магнитоэлектрического фильтра при использовании различных систем металлов (рисунок 2.2). Данная характеристика в работе оценивалась по отношению массы покрытия к изменению массы использованных катодов. Анализ результатов экспериментов показал, что оптимальные значения силы тока на транспортирующем соленоиде (5), обеспечивающие минимальные потери многокомпонентного плазменного потока, находятся в интервале 0,5–0,9 А (рисунок 2.2).

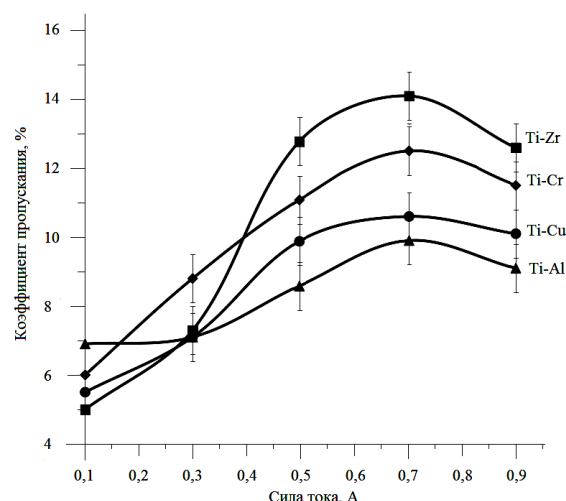
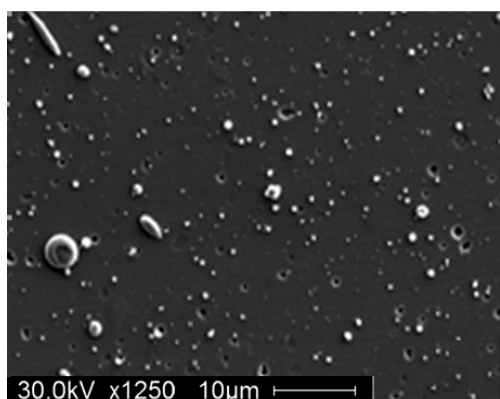
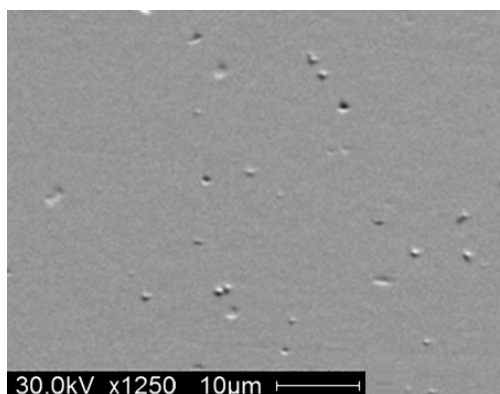


Рисунок 2.2 – Зависимость коэффициента пропускания сепарирующей системы от силы тока на транспортирующем соленоиде ($I_{Ti} = 60$ А, $I_{Al} = 60$ А, $I_{Zr} = 60$ А, $I_{Cu} = 60$ А, $I_{Cr} = 60$ А)



а) покрытие (Ti, Al) N без использования сепарирующей системы



б) покрытие (Ti, Al) N с использованием сепарирующей системы

Рисунок 2.3 – Морфология поверхности осаждаемых покрытий

В результате проведённых экспериментов установлено, что применение разработанного магнитоэлектрического фильтра позволяет значительно снизить шероховатость поверхности осаждаемых покрытий, в частности, для покрытий (Ti, Al) N зарегистрировано уменьшение показателя Ra в 3 раза (рисунок 2.3).

Основными задачами оптимизации магнитных полей в сепарирующей системе, кроме снижения гетерофазности плазменного потока, является обеспечение производительности процесса, повышение эффективной площади осаждения, обеспечение однородности распределения толщины и элементного состава по поверхности конденсации, также к этому относят центрирование плазменного потока относительно выхода сепаратора [13]–[15].

Известно, что при использовании криволинейных магнитоэлектрических фильтров за счёт движения ионов плазмы по искривлённым траекториям вследствие неоднородности магнитного поля может наблюдаться как центробежный, так и градиентный дрейф плазмы [13]. Результатом данных явлений может быть смещение плазменного потока относительно выхода сепаратора, а в случае формирования многокомпонентной металлической плазмы и различие элементного состава осаждаемых покрытий в зависимости от местоположения покрываемых деталей в вакуумной камере.

В настоящей работе для разработанной конструкции сепарирующей системы было изучено распределение элементов в плазменных потоках в зоне осаждения для систем плазмообразующих металлов Ti – Zr, Ti – Cr, Ti – Al, Ti – Cu.

Эксперименты по определению относительной концентрации металлов в составе покрытий проводились без подачи реакционного газа в вакуумную камеру, так как рассеяние на атомах и молекулах газа может приводить к изменению параметров металлической плазмы.

Анализ полученных результатов показал, что предложенная конструкция двухканального магнитоэлектрического фильтра обеспечивает перемешивание потоков металлической плазмы из разных источников в плазмодоме, в отличие, например, от систем с Т-образным фильтром [16]. Ширина распределения относительной концентрации титана к легирующему элементу в плазменном потоке зависит от материала легирующего элемента, причём наблюдается тенденция к более широкому распределению для материалов с большей массой (рисунок 2.4).

Однако для всех рассмотренных систем наблюдаются неоднородность многокомпонентного плазменного потока в пределах угла разлёта и смещение максимума распределения относительной концентрации от центральной оси плазмодома, причём величина смещения зависит от материала используемых катодов. При заданных технологических параметрах процесса наблюдается превышение концентрации титана над концентрацией легирующего элемента, причём, в случае использования в качестве второй составляющей в плазменном потоке меди, это отношение может достигать 30 раз. По-видимому, в этом случае важную роль играет значительное различие в энергии ионизации титана и меди, что при использовании магнитоэлектрического фильтра приводит к оседанию нейтральных частиц и молекул меди на стенках плазмодома.

Установленная неоднородность элементного состава многокомпонентного плазменного потока по его сечению может существенным образом влиять на элементный состав осаждаемых покрытий, что в свою очередь приводит к изменению эксплуатационных свойств многокомпонентных покрытий [17].

Исходя из полученных результатов, на первоначальном этапе для обеспечения стабильности состава формируемых покрытий необходимо было решить задачу центрирования плазменного потока относительно выхода сепаратора.

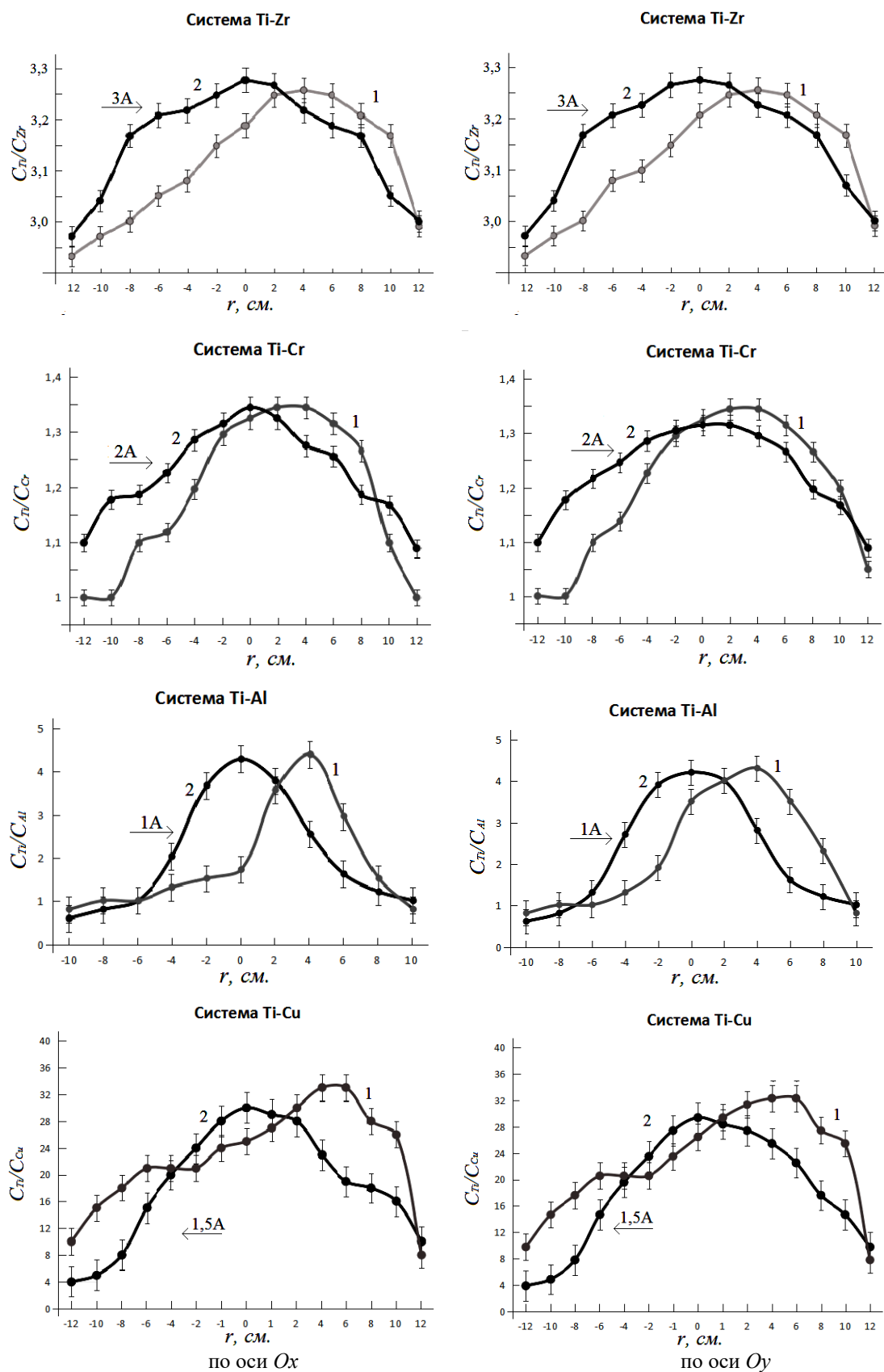


Рисунок 2.4 – Распределение относительной концентрации титана к легирующему элементу в многокомпонентных покрытиях в вакуумной камере:

- 1 – без подачи тока на дополнительный соленоид;
- 2 – при подаче тока на дополнительный соленоид

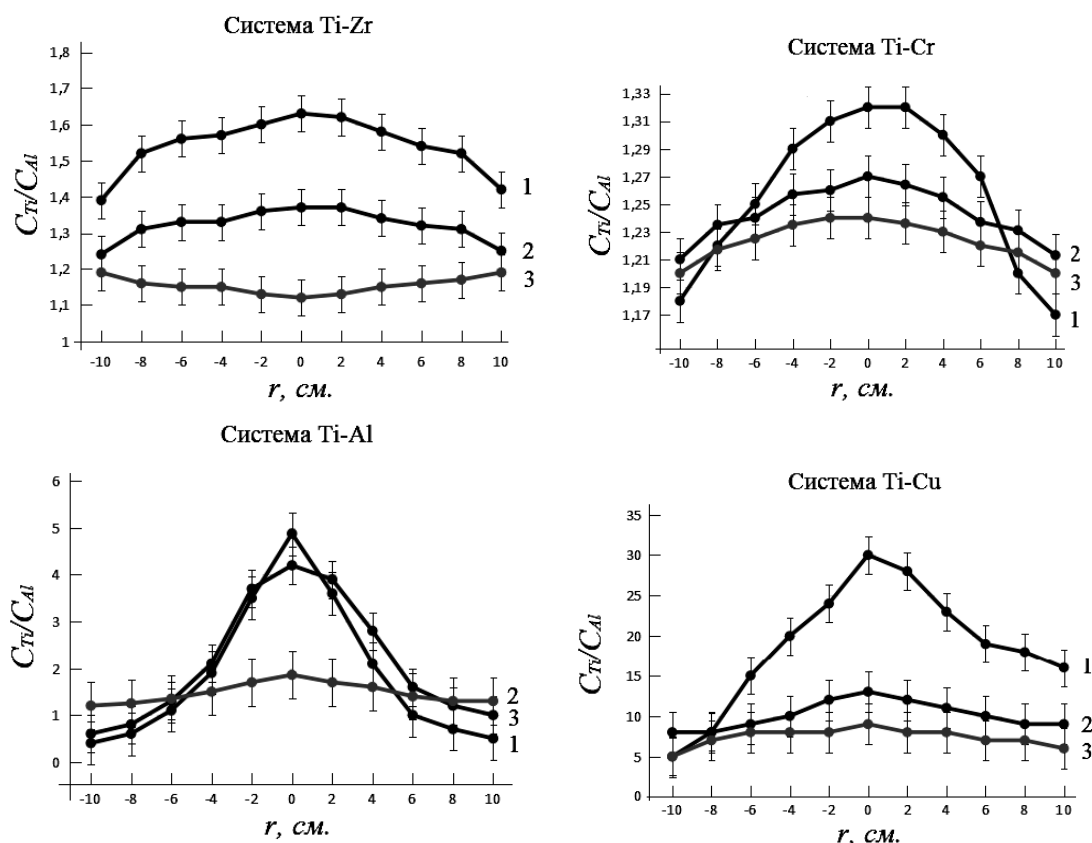


Рисунок 2.5 – Распределение относительной концентрации титана к легирующему элементу в многокомпонентных покрытиях в вакуумной камере при различных токах дугового разряда на катоде из легирующего элемента: 1 – 60А, 2 – 70А, 3 – 80А

Управление транспортировкой многокомпонентного плазменного потока в настоящей работе было предложено путём изменения топографии магнитного и, соответственно, электрического полей за счёт подключения дополнительного соленоида (6), размещённого на внешней стороне вакуумной камеры (рисунок 2.1).

Исследования показали, что различие в атомной массе легирующего элемента и титана оказывает влияние на величину силы тока на дополнительном соленоиде для смещения максимума функции распределения концентрации элементов в плазменном потоке относительно центральной оси плазмоведа (рисунок 2.4). Так, в результате экспериментов было установлено, что для центрирования многокомпонентного плазменного потока для системы Ti – Zr на дополнительном соленоиде необходимо максимальное для всех рассмотренных систем значение силы тока, равное 3,0 А, минимальное – 1,0 А для системы Ti – Al.

Важной задачей применения технологии вакуумно-дугового осаждения является стабильность элементного состава покрытий в пределах одного технологического цикла.

Как показали эксперименты, управление элементным составом многокомпонентных покрытий может осуществляться за счёт асимметрии

токов на испарителях при постоянстве магнитных полей внутри двухкатодного магнитоэлектрического фильтра (рисунок 2.5).

Варьирование значениями силы тока на испарителях позволяет увеличить ширину поперечного сечения плазменного потока с минимальным различием в элементном составе для всех используемых материалов.

Необходимо отметить, что данный эффект достигается при разных значениях токов для исследуемых материалов. Так, для систем титан – цирконий, титан – медь увеличение тока дуги уже до 70 А на втором катоде (цирконий / медь) приводит к положительному результату, в тоже время для системы титан-хром необходимо увеличение тока дуги для испарителя с хромовым катодом до 80 А.

Установлено, что для системы титан – алюминий равномерное концентрационное распределение достигается только при токе дуги на алюминиевом катоде равном 70 А, дальнейшее повышение тока приводит к резкому уменьшению содержания алюминия в покрытии. Это, в первую очередь, является результатом работы магнитоэлектрического фильтра, так как с увеличением тока дуги на испарителе с алюминиевым катодом в плазменном потоке увеличивается объёмное содержание микрокапельной фазы

алюминия, которая при прохождении через фильтр оседает на стенках плазмоведа.

Таким образом, процесс вакуумно-плазменного осаждения многокомпонентных покрытий с использованием сепарированных плазменных потоков позволяет формировать покрытия с высокой плотностью, низкой шероховатостью и однородным распределением элементов в объеме покрытия.

Заключение

Разработан двухкатодный магнитоэлектрический фильтр для снижения гетерофазности плазменного потока, генерируемого электрической дугой, при формировании многокомпонентных покрытий. Изучено влияние конфигурации магнитных полей в сепарирующей системе на пространственное распределение концентрации элементов плазменного потока в вакуумной камере. Определены технологические условия для управления максимумом распределения элементов в многокомпонентном плазменном потоке относительно центральной оси плазмоведа.

Проведённые эксперименты показали, что при использовании сепарирующей системы с Y-образным плазмоводом управление соотношением элементов в осаждаемых покрытиях возможно при изменении расположения деталей в вакуумной камере и за счёт асимметрии токов дугового разряда на испарителях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белый, А.В. Инженерия поверхностей металлов и сплавов с использованием многокомпонентных плазменных потоков и ионно-ассистированного осаждения / А.В. Белый, С.Д. Латушкина. – Минск: Беларуская навука, 2024. – 151 с.
2. Тополянский, П.А. Выбор тонкоплёночных покрытий для упрочнения изделий / П.А. Тополянский, С.А. Ермаков, А.П. Тополянский // Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта: теория и практика: Материалы Международной научно-практической конференции. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2016. – С. 194–205.
3. Александров, Д.А. Исследование износостойких покрытий на основе многокомпонентных нитридов титана / Д.А. Александров // Труды ВИАМ. – 2020. – № 4–5 (88). – С. 62–69.
4. Табаков, В.П. Формирование износостойких ионно-плазменных покрытий режущего инструмента / В.П. Табаков. – Москва: Машиностроение, 2008. – 311 с.
5. Плазменно-вакуумные покрытия / Ж.А. Мрочек [и др.]. – Минск: Технопринт, 2004. – 368 с.
6. PalDey, S. Single layer and multilayer wear resistant coatings of (Ti, Al) N: a review / S. PalDey,

S.C. Deevi // Materials Science and Engineering. – 2003. – Vol. 342. – P. 58–79.

7. Инженерия вакуумно-плазменных покрытий / Н.А. Азаренков [и др.]. – Харьков: ХНУ имени В.Н. Каразина, 2011. – 343 с.
8. Filtered cathodic vacuum arc deposition (FCVAD) technology as method for creation of nanostructured multicomponent modifying coatings for wide application range / A. Vereschaka [et al.] // Procedia CIRP. – 2020. – Vol. 95. – P. 999–1003.
9. Bernard, F. Design of vacuum arc-based plasma sources / F. Bernard, B.F. Coll, D.M. Sanders // Surf. Coat. Technol. – 1996. – Vol. 81. – P. 42–51.
10. Anders, A. Approaches to rid cathodic arc plasmas of macro- and nanoparticles: a review / A. Anders // Surf. Coat. Technol. – 1999. – Vol. 120. – P. 319–330.
11. Transport of macroparticles in magnetized plasma ducts / M. Keidar, I. Beilis, R.L. Boxman, S. Goldsmith. – Proc. 12th Int. Symp. on Plasma Chem., Aug. 1995, Minneapolis, Minnesota, USA. – Vol. 3. – P. 1367–1370.
12. Boxman, R.L. Macroparticles contamination in cathodic arc coatings: generation, transport and control / R.L. Boxman, S. Goldsmith // Surf. Coat. Technol. – 1992. – Vol. 52. – P. 39–50.
13. Аксенов, И.И. Вакуумная дуга в эрозийных источниках плазмы / И.И. Аксенов. – Харьков: ННЦ ХФТИ, 2005. – 212 с.
14. Транспортировка вакуумно-дуговой плазмы в неоднородном магнитном поле / И.И. Аксенов, В.В. Васильев, А.А. Лучанинов, В.Е. Стрельницкий // Вопросы атомной науки и техники. – 2005. – № 5. – С. 142–146.
15. Modelling of cathodic arc PVD plasma flow in separator with non-uniform magnetic field / A.V. Chernogor [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – P. 1313, 012011.
16. Формирование потоков вакуумно-дуговой источниками с широкоапертурным фильтром / И.И. Аксенов [и др.] // Вестник Харьковского университета. – 2008. – № 794. – С. 3–20.
17. Латушкина, С.Д. Особенности структурообразования и защитных свойств многокомпонентных покрытий, осаждаемых из плазмы вакуумно-дугового разряда / С.Д. Латушкина, О.И. Посылкина // Актуальные проблемы прочности. – Витебск, 2018. – Гл. 4. – С. 63–85.

Поступила в редакцию 28.02.2025.

Информация об авторах

Латушкина Светлана Дмитриевна – к.т.н., доцент
Романов Игорь Михайлович – к.ф.-м.н.
Посылкина Ольга Ивановна – к.т.н.
Сечко Иван Андреевич – аспирант
Комаровская Виктория Маратовна – к.т.н., доцент