

PACS: 52.50.Dg, 52.77.Dq

## PLASMA FILTERS IN TECHNIQUE OF THE VACUUM-ARC COMPOSITE COATING DEPOSITION

**D.S. Aksyonov, I.I. Aksenov, V.A. Belous, Yu.A. Besedina, S.I. Mel'nikov**

*National Science Centre "Kharkov Institute of Physics and Technology"*

*Academicheskaya Str. 1, Kharkov 61108, Ukraine*

*e mail: [iaksenov.nskipt@gmail.com](mailto:iaksenov.nskipt@gmail.com)*

*Received January 30, 2014*

The brief survey of devices for micro- and nanostructured composite coatings formation by deposition from a filtered cathodic arc plasma is given. The main attention is paid on the features specifying that how uniform is thickness and composition distribution of the coating deposited by use of those devices. Analysis of the publications showed that in respect of ability to obtain uniform coatings the wide-aperture single- and two-channel systems with acute-angled or "specular" magnetic fields are the most perspective. The setup which have been tested rigidly in industrial conditions, and designed efficient setups equipped with the said systems are described as examples.

**KEYWORDS:** T-shaped two-channel filter, conceptual model, composite coating, cathodic arc plasma

### ПЛАЗМОВІ ФІЛЬТРИ В ТЕХНІЦІ ОСАДЖЕННЯ ВАКУУМНО-ДУГОВИХ КОМПОЗИТНИХ ПОКРИТТІВ

**Д.С. Аксьонов, І.І. Аксьонов, В.А. Білоус, Ю.О. Бесєдіна, С.І. Мельнік**

*Національний науковий центр „Харківський фізико-технічний інститут”*

*вул. Академічна, 1, Харків 61108, Україна*

Наведений короткий огляд пристроїв для формування мікро- та наноструктурованих композитних покриттів осадженням з фільтрованої вакуумно-дугової плазми. Основну увагу приділено тому, наскільки однорідно за складом і товщиною розподіляється по поверхні конденсації покриття, що осаджується за допомогою пристроїв, що розглядаються. Аналіз публікацій показав, що у відношенні здатності одержання однорідних за складом і товщиною покриттів найбільш перспективними є широкоапертурні одно- та двоканальні системи фільтрації з гострокутовою та „дзеркальною” геометріями транспортуючих магнітних полів. В якості прикладу описані установки: що виготовлена і пройшла жорсткі випробування в умовах виробництва, та високопродуктивна установка, оснащена зазначеними системами, яка проектується.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** Т-подібний двоканальний фільтр, концептуальна модель, композитні покриття, вакуумно-дугова плазма

### ПЛАЗМЕННЫЕ ФИЛЬТРЫ В ТЕХНИКЕ ОСАЖДЕНИЯ ВАКУУМНО-ДУГОВЫХ КОМПОЗИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

**Д.С. Аксёнов, И.И. Аксёнов, В.А. Белоус, Ю. Беседина, С.И. Мельников**

*Национальный Научный Центр "Харьковский физико-технический институт"*

*ул. Академическая 1, Харьков 61108, Украина*

Приведен краткий обзор устройств для формирования микро- и наноструктурированных покрытий сложного состава осаждением из фильтрованной вакуумно-дуговой плазмы. В статье основное внимание уделено тому, насколько однородно по составу и толщине распределяется по поверхности конденсации покрытие, осаждаемое с помощью рассматриваемых устройств. Анализ публикаций показал, что в отношении способности получения однородных по составу и толщине покрытий наиболее перспективны широкоапертурные одно- и двухканальные системы фильтрации с остроугольной и пробочной геометрией транспортирующих магнитных полей. В качестве примеров описаны прошедшая испытания в производственных условиях и проектируемые высокопроизводительные установки, оснащенные упомянутыми системами.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** Т-образный двухканальный фильтр, концептуальная модель, композитные покрытия, вакуумно-дуговая плазма

Высокотвёрдые композиционные покрытия на основе нитридов и/или карбидов двух и более металлов отличаются более высокими (по сравнению с однокомпонентными покрытиями) механическими характеристиками и находят всё более широкое применение в качестве износостойких и антифрикционных поверхностных слоёв в инструментальном производстве и в машиностроении [1]. Из PVD. (physical vapor deposition – физическое осаждение из паровой фазы) методов наиболее перспективным представляется вакуумно-дуговое осаждение [2–4]. Простейшая и наиболее распространённая методика такого осаждения заключается в конденсации плазмы, генерируемой вакуумной дугой с расходуемым катодом из материала, состав которого обеспечивает требуемое процентное содержание компонентов покрытия. Недостаток метода заключается в сложности и высокой стоимости изготовления мишеней требуемого состава.

Попытки упростить проблему, заменив катод из монолитного материала сложного состава мозаичным катодом, где в основной металл запрессовываются вставки другого металла, практически не имели успеха: состав покрытий, получаемых с применением таких электродов, неконтролируемым образом изменяется по мере «выгорания» катодной мозаики. Данная «неконтролируемость» в значительной степени ослаблена в установках, оснащённых испарителем, разработанным авторами работы [5]. Катод испарителя состоит из двух частей, изготовленных из разных материалов. Изменяя величину и геометрию магнитного поля, управляют перемещением КП с одной части катода на другую с частотой до 1 кГц, что позволяет достичь равномерной

эрозии катода и, следовательно, равномерного распределения толщины покрытия по поверхности подложки. Что же касается распределения концентрации компонентов по поверхности конденсации, то здесь вопрос остаётся открытым.

Другой подход к решению проблемы заключается в одновременном или поочерёдном осаждении конденсата из потоков плазмы от источника с двумя или более катодами из разных металлов [6,7]. Плазменные потоки направляются на подложку через общий прямолинейный плазмод с продольным ведущим магнитным полем. Поскольку плазма от каждого катода в такой системе транспортируется «своим» пучком магнитных силовых линий, пересекающих рабочий торец «своего» катода [3,4], плазменные потоки, проходя вдоль плазмоды, практически не смешиваются. В результате, при конденсации потоков формируется покрытие с сильно неоднородным распределением концентрации компонентов по поверхности подложки.

Приём, который позволяет добиться более-менее равномерного распределения концентраций компонентов покрытия по поверхности подложки, заключается в послойном осаждении потоков плазмы, генерируемых двумя (или более) источниками с катодами из разных материалов, расположенными на боковой поверхности технологической камеры. Обрабатываемое изделие при этом вращается перед источниками со скоростью, необходимой для обеспечения требуемой толщины слоёв наносимого покрытия [8]. Типичными установкам, позволяющими осуществить данный технологический процесс, являются серийные установки типа «Булат» [9]. Покрытия, получаемые данным способом, имеют слоистую структуру.

Представляет интерес система для нанесения покрытий из чередующихся слоёв двух металлов [10]. Источниками плазмы здесь служат два параллельно расположенных цилиндрических катода, вращающихся вокруг собственных осей. Катодное пятно на каждом катоде совершает возвратно-поступательное движение вдоль образующей цилиндра, обеспечивая тем самым равномерную эрозию электродов и, следовательно, равномерное распределение составляющих покрытий по поверхности обрабатываемого объекта (подложки). Перемещение катодных пятен вдоль образующей каждого из цилиндров осуществляется с помощью магнитного поля.

В описанных системах не предусмотрены меры по удалению из конденсируемой плазмы макрочастиц (МЧ) катодного материала, снижающих качество покрытий. Плазменные источники и установки, оснащённые одно- и многоканальными фильтрующими системами для осаждения микро- и наноструктурированных композитных покрытий рассмотрены в нижеследующих разделах.

Целью настоящей работы является анализ имеющихся сведений для выявления наиболее перспективных технических решений, могущих послужить основой для создания высокопроизводительных вакуумно-дуговых установок, обеспечивающих возможность формирования высококачественных покрытий сложного состава с равномерным распределением толщины и компонентов по поверхности конденсации.

## **ВАКУУМНО-ДУГОВЫЕ ИСТОЧНИКИ ПЛАЗМЫ С ФИЛЬТРАМИ ДЛЯ ОСАЖДЕНИЯ КОМПОЗИТНЫХ ПОКРЫТИЙ**

### **Системы с одно- и двухканальными фильтрами**

Проблема макрочастиц наиболее кардинально решается с помощью фильтрующих устройств, действие которых основано на пропускании плазмы вдоль криволинейных магнитоэлектрических плазмодов (МЭП) [3]. В таких системах заряженные компоненты – ионы и электроны – транспортируются от места их эмиссии – катодного пятна (КП) до подложки по криволинейным траекториям, повторяющим изгибы МЭП, а тяжелые незаряженные или слабо заряженные макроблоки и нейтралы, не реагируют ни на электрические, ни на магнитные поля и потому, двигаясь по прямой, улавливаются стенками МЭП и на выход системы не попадают. Фильтр является также эффективным инструментом, с помощью которого можно управлять в широком интервале плотностью потока плазмы на подложку, регулируя тем самым скорость роста конденсата. Одновременно обеспечивается возможность снижения теплового потока на подложку и ограничения температуры ее нагрева допустимыми пределами.

Авторами работы [11] описана система с миниатюрным импульсным двухкатодным источником вакуумно-дуговой плазмы с общим цилиндрическим анодом и плазменным фильтром открытой архитектуры [2]. В описанных экспериментах осаждали плёнки  $\text{Ta-C:Mo}$  и поэтому один из катодов был выполнен из графита, а другой – из молибдена. В связи с тем, что катоды как центры эмиссии потоков плазмы углерода и металла разнесены на некоторое расстояние друг от друга, максимумы плотности конденсата этих материалов на подложке также смещены относительно друг друга.

Существенное повышение однородности распределения покрытия по толщине на подложке достигалось применением многополюсного магнитного «гомогенизатора» [2, 12,13]. Однако значительная неравномерность этого распределения сохранялась и в данном случае. Толщина конденсата в центре подложки диаметром 10 см превышала толщину покрытия на её краях почти на 40 %.

В работе [14] исследовались многослойные  $\text{TiN/AlN}$  и композитные  $\text{TiAlN}$  плёнки, полученные в системе, устройство которой иллюстрирует рис. 1. Система содержит два источника плазмы с катодами из разных материалов (в рассматриваемом случае – из титана и алюминия), двух тороидальных ( $90^\circ$ ) фильтров и электромагнитного смесителя. Регулируя частоту следования и очерёдность включений источников, получали

многослойные TiN/AlN плёнки с различной структурой. Композитные TiAlN плёнки осаждали в режиме одновременной работы источников. Сведений о распределении скорости осаждения и концентрации компонентов композитных покрытий по поверхности подложки не имеется.

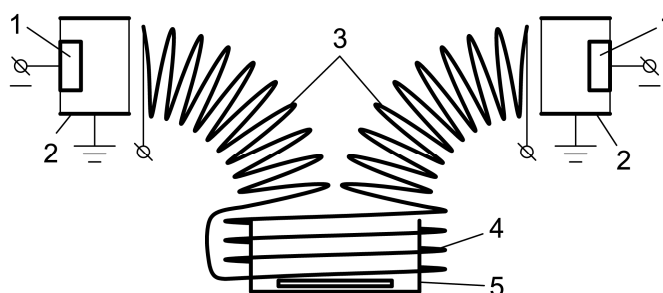


Рис. 1. Двухканальная система с тороидальными фильтрами и смесителем для осаждения композитных однослойных и многослойных покрытий [14]  
катоды (1), аноды (2), фильтры (3), смеситель (4), экран с подложкой (5)

Ксу Ши и др. [15] предложили двухканальный источник фильтрованной плазмы (рис. 2). В его состав входят два генератора плазмы с магнитной стабилизацией дуги и плазмовод с двумя входными и одной общей выходной секцией (в форме буквы Y). Через выходную секцию смешанный поток плазмы от двух генераторов попадает на подложку. В каждой входной секции размещён фильтр 10 в виде диафрагмы, охваченной фокусирующей катушкой. С помощью диафрагмы отсекается периферийная, наиболее интенсивная, часть потока МЧ, а ионная составляющая плазмы, сфокусированная магнитным полем катушки, проходит сквозь отверстие диафрагмы и через индивидуальный канал плазмоведа поступает в общий, выходной, отрезок плазмоведа 4 и далее на подложку 9.

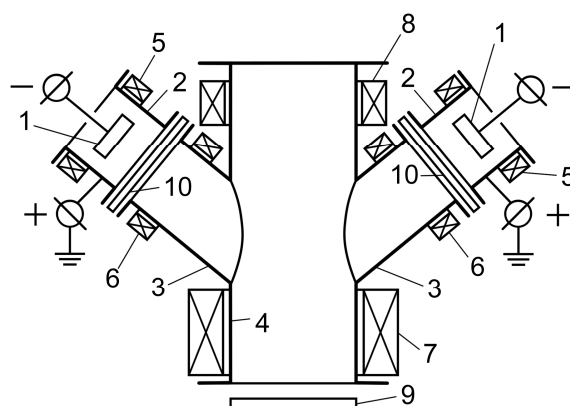


Рис. 2. Двухканальный источник фильтрованной плазмы  
1 – катоды, 2 – аноды, 3 и 4 – входные и выходные секции плазмоведа соответственно, 5 – 8 – катушки, 9 – подложка, 10 – фильтр-диафрагма [15]

Такикава и Тану в обзоре [16] сообщают о разработке источника вакуумно-дуговой плазмы с фильтром Y-типа (рис. 3). Такой источник аналогичен источнику Ксу Ши без фильтрующих диафрагм. По результатам исследований [17] установлено, что в системе Y-типа с катодами из титана и алюминия смешения потоков плазмы не происходит. В связи с этим равномерного распределения компонентов в формируемых плёнках получить не удалось.

Гороховским в патенте [18] описан двухкатодный источник плазмы с T-образным фильтром (рис. 4). Встречные плазменные потоки от двух катодов по входным плазмоведам направлялись в общий для них выходной плазмовод. Последний разделён плоским продольным элементом (на рисунке – поз. 7) на два практически независимых друг от друга плазмоведающих канала. Потоки плазмы от двух катодов после поворота на  $90^\circ$  проходят на подложку через выходной плазмовод, каждый по своему каналу, не смешиваясь. В этой связи источник в том виде, как он описан в патенте, может быть использован для нанесения слоистых покрытий на основе двух материалов, но не пригоден для формирования однородных по составу композитных покрытий при использовании моноэлементных катодов.

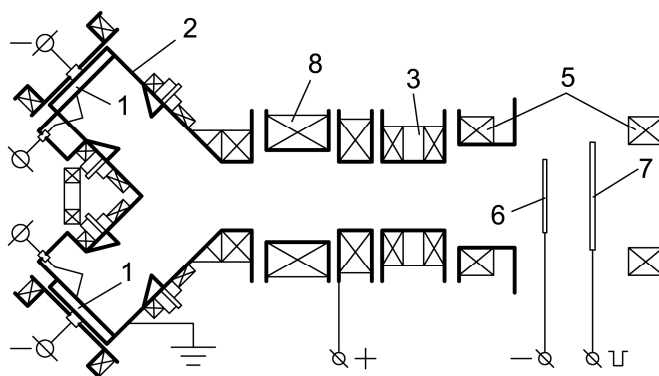


Рис. 3. Источник плазмы с Y-образным фильтром

1 – катод, 2 – анод, 3 – отклоняющие катушки, 5 – катушки выравнивателя поля, 6 – заслонка, 7 – подложка, 8 – смеситель [16]

Рассмотренные источники плазмы обладают, как известно, сравнительно невысокой производительностью и, оставаясь достаточно сложными системами с низким коэффициентом полезного использования плазмообразующего материала, не позволяют решать вопросы эффективности перемешивания нескольких потоков плазмы и равномерности распределения плотности выходного потока по его сечению. Решение этих вопросов является непременным условием успешного преодоления проблемы вакуумно-дугового синтеза качественных композитных покрытий, особенно наноструктурированных, в условиях промышленного производства.

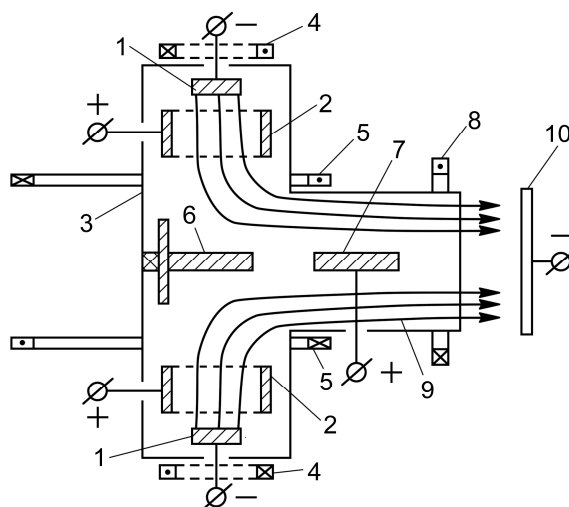


Рис. 4. Двухкатодный источник фильтрованной плазмы с T-образным плазмододом

1 – катод, 2 – анод, 3 – плазмодод, 4 – катодная катушка, 5 – отклоняющие катушки, 6, 7 – отклоняющие электроды, 8 – выходная фокусирующая катушка, 9 – выходная секция плазмодода, 10 – подложка [18]

### Системы с широкоапертурными двухканальными фильтрами

Возможность формировать одновременно равнотолщинное и однородное по составу покрытие не может быть достигнута без обеспечения условий для более качественного смешения компонентов конденсируемого плазменного потока и выравнивания плотности плазмы по его сечению. Можно было ожидать, что смешение потоков, транспортируемых к подложке каждый своим пучком магнитных силовых линий, произойдет более эффективно, если в области смешения будет сформирована зона со слабым (почти нулевым) полем в приосевой области и усиленным – по её периферии. Действительно, внутри такой зоны магнитное поле теряет свои «удерживающие» свойства и не препятствует смешиванию плазменных потоков. В этом отношении представляют интерес системы с остроугольной и пробочной геометрией пространственного распределения магнитных полей. Вариантом решения проблемы производительности также могут служить осесимметричные МЭП с полями остроугольной или пробочной геометрии. Генерируемый катодным пятном и движущийся вдоль оси сфокусированный поток плазмы в таких системах трансформируется в широкий радиальный поток с

симметричным и однородным по азимуту распределением плотности. Это позволяет обрабатывать одновременно в несколько раз большее количество изделий (по сравнению с устройствами с однонаправленными потоками плазмы), что в определенных условиях равнозначно повышению производительности процесса [3].

Прототипом плазменных систем такого типа является разработанная в ННЦ ХФТИ двухканальная система формирования радиальных потоков плазмы (СФРП), которая достаточно подробно описана в [3]. Схема СФРП представлена на рис. 5. Система содержит два одинаковых источника плазмы с магнитной фокусировкой. Источники размещены соосно и обращены выходными торцами друг к другу. Два потока плазмы, генерируемые дугowymi разрядами источников с катодами 1 из одного и того же или разных плазмообразующих материалов, смешиваются в области минимума магнитного поля между анодами 2. Заряженные компоненты смешанной плазмы в виде радиального веерообразного потока уходят из системы через кольцевой зазор между анодами на подложки 4, размещаемые вокруг этого зазора. МЧ, двигаясь по прямолинейным траекториям, на подложки не попадают. Для случая титановой плазмы коэффициент пропускания ионного компонента  $I_{i\text{ex}} / I_{i\text{ent}}$  и коэффициент эффективности системы  $I_{i\text{ex}} / I_{\text{arc}}$  ( $I_{i\text{ex}}$  и  $I_{i\text{ent}}$  – ионные токи на выходе и входе системы,  $I_{\text{arc}}$  – ток дуги) составляют, соответственно,  $\sim 90\%$  и  $8,4\%$ . Это в  $2 \div 7$  раз выше, чем для других наиболее совершенных систем [3,19].

Первые результаты исследования возможностей применения данной системы для формирования покрытий сложного состава опубликованы в работе [20]. Полученные данные свидетельствуют о том, что исследуемая система является эффективным средством для формирования композиционных наноструктурных плёнок (покрытий) на основе двух металлов с возможностью регулировки относительного содержания компонентов в процессе осаждения покрытия. Показано, что относительное содержание составляющих конденсата зависит как от концентрации металлических компонентов плазмы, которые поступают к поверхности конденсации, так и от давления и природы газа, присутствующего в зоне осаждения, в частности – от распыляющей способности этого газа. При этом обеспечивается одно из важнейших преимуществ исследуемой системы – возможность осаждения покрытий с однородным распределением толщины по площади, значительно превышающей площадь, обрабатываемую с помощью любой другой известной системы аналогичного назначения. Ещё одно важное преимущество рассматриваемой системы заключается в значительном снижении средней энергии частиц в радиальном, выходном, потоке плазмы по сравнению с их энергией в первичных аксиальных потоках [3]. Эта особенность системы открывает возможность использования вакуумно-дугowych методов для осаждения покрытий на материалы с низким энергетическим порогом деградации. Например, в случае нанесения защитных покрытий на оптические элементы из полимеров или на магнитные слои жёстких дисков памяти, а также на магнитные головки для записи и считывания информации. Однако получаемые покрытия неоднородны по фазовому составу. Кроме того, на формирование покрытий в зоне равнотолщинности и однородности состава покрытия расходуетсся существенно меньшая часть выходного потока фильтрованной плазмы. В этом отношении, как полагают авторы, требуются дальнейшие работы по усовершенствованию системы и исследованию её возможностей. В другой работе [21] приведены результаты экспериментов по формированию в обсуждаемой системе трёхкомпонентных покрытий (без учёта газовой составляющей). С применением катодов из Mg или Mo в одном плече системы и из композита  $\text{Ti}_{0,9}\text{Al}_{0,1}$  в другом получены покрытия  $(\text{Ti}_{0,92}\text{Al}_{0,07}\text{Mo}_{0,01})\text{N}$  и  $(\text{Ti}_{0,88}\text{Al}_{0,06}\text{Mg}_{0,06})\text{N}$  сверхвысокой твёрдости ( $>40$  ГПа). Покрытия отличаются высокой термической стабильностью. Конденсаты  $(\text{Ti-Al-Mg})\text{N}$  сохраняют первоначальную твёрдость при нагреве до  $1000^\circ\text{C}$ , а  $(\text{Ti-Al-Mo})\text{N}$  – до  $1200^\circ\text{C}$ . Косвенно это также свидетельствует о возможности применения данной системы для получения нанокomпозитных покрытий.

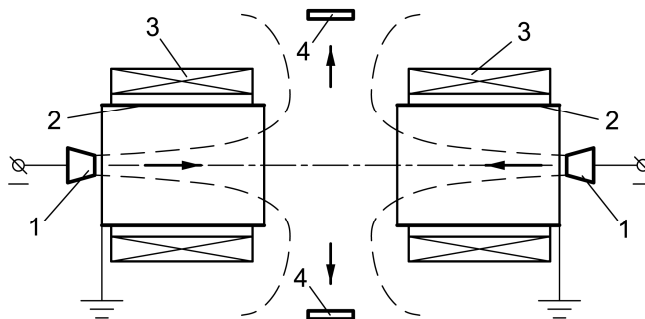


Рис. 5. Система формирования радиальных потоков плазмы (СФРП)

1 – катоды, 2 – аноды, 3 – магнитные катушки, 4 – подложки

Акцентируя внимание на важных преимуществах системы с преобразованием двух встречных аксиальных потоков в один общий радиальный поток, нельзя не отметить то обстоятельство, что применение такой системы

с веерообразным плазменным потоком на выходе в производственной практике не всегда оправдано. В ряде случаев представляется более целесообразным располагать системой, которая при высокой эффективности позволяет формировать однонаправленный поток плазмы. Схема устройства такого типа изображена на рис. 6 [22]. В отличие от СФРП распределение магнитных полей в нём асимметричное, обеспечивающее поворот встречных потоков плазмы на 90° в сторону общего выходного плазмоведа 5. Объединённые аноды 2 совместно с плазмоводом 5 представляют собой двухканальный Т-образный плазмовод.

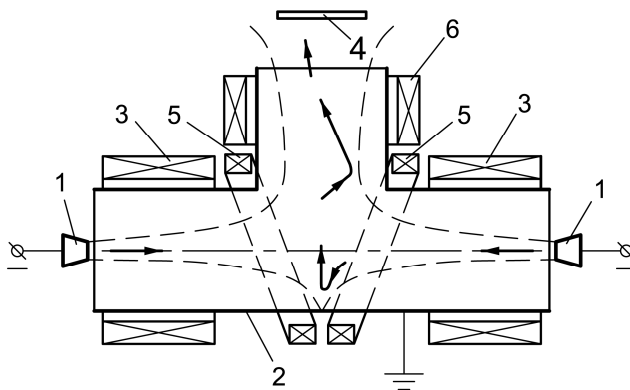


Рис. 6. Двухканальный вакуумно-дуговой источник фильтрованной плазмы с асимметричным остроугольным распределениями магнитного поля  
 1 – катоды, 2 – аноды, 3 – магнитные катушки, 4 – подложка, 5 – выходной плазмовод

Высказанное предположение о возможности использования полей остроугольной и пробочной геометрии для выравнивания однородности состава и плотности плазменных потоков в значительной мере оправдывается приведенными в работе [23] результатами экспериментов по формированию Ti-Si и Ti-Si-N покрытий, синтезируемых с применением вакуумно-дугового источника фильтрованной плазмы с расходуемым титан-кремниевым катодом. Очистка плазмы от МЧ в этих экспериментах осуществлялась с помощью Т-образного фильтра. Установлено, что путём регулировки параметров процесса осаждения (давления рабочего газа в реакционном объёме установки, отрицательного потенциала смещения на подложке, напряжённости и формы распределения магнитных полей в плазменном источнике) концентрацию кремния в конденсате можно изменять в широких пределах – от нуля до максимального значения, определяемого его содержанием в катод. При осаждении в режиме с ослабленным магнитным полем на выходе системы концентрация кремния в Ti-Si-N покрытии диаметром ~ 12 см составляла  $4 \pm 0,25$  % (против 5 % в катод). Этот результат несколько выше, чем в экспериментах, описанных в работе [12], хотя и получен в отсутствие гомогенизатора.

Многоканальный источник фильтрованной вакуумно-дуговой плазмы описан в патенте [24]. Варианты исполнения источника базируются на одном или комбинации нескольких Т-образных широкоапертурных плазмоводов. Некоторые из комбинаций обеспечивают поворот плазменного потока на 180°, в том числе и в виде суммы поворотов в двух разных плоскостях, тем самым исключая взаимное запыление катодов продуктами их эрозии – нейтральными парами и макрочастицами.

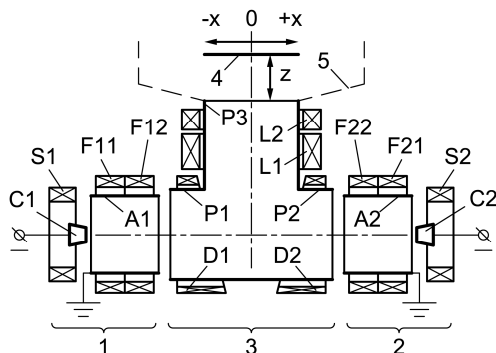


Рис. 7. Схема вакуумно-дугового источника плазмы с двухканальным Т-образным фильтром  
 1, 2 – генераторы плазмы, 3 – Т-образный фильтр, 4 – местоположение подложки, A1 и A2 – аноды, C1 и C2 – катоды, S1 и S2 – стабилизирующие катушки, F11, F12 и F21, F22 – анодные (фокусирующие) катушки, D1 и D2 – отклоняющие катушки, L1 и L2 – выходные катушки, P1 и P2 – входные секции плазмоведа, P3 – выходная секция плазмоведа

Из рассмотренных источников плазмы с двухканальными фильтрами наиболее изучен вариант по патенту [24], представленный на рис. 7. Своим выходным торцом плазмовод пристыкован к вакуумной камере

установки "Булат-6" (не показана). Более детально устройство описано в работах [24–26]. В исследованном варианте источника катод С1 был изготовлен из алюминия, катод С2 – из титана. Источник обеспечивает возможность формирования композитных покрытий на основе двух металлов с достаточно однородным распределением концентрации компонентов (около  $\pm 6,5\%$ ). Максимальное значение системного коэффициента эффективности (отношения величин выходного ионного тока к току дуги) в условиях экспериментов составляло 2,5 %. Регулировкой магнитных полей в плазмоведущих каналах источника можно в широких пределах управлять величиной ионного компонента выходного плазменного потока и диаграммой распределения его плотности;

## МОДЕЛИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

### Общие сведения об установке-прототипе

В последние годы в ННЦ ХФТИ разработаны проекты высокопроизводительных установок, в концепцию которых легли новые конструкторские решения, обеспечивающие реализацию передовых вакуумно-дуговых технологий, в том числе – методов формирования композитных микро- и наноструктурных покрытий, получение которых в условиях промышленного производства прежними средствами остаётся невозможным. Прототипом новых концептуальных моделей установок можно считать разработанную в ХФТИ установку Булат-9, изготовленную в двух экземплярах опытным производством Института два десятилетия назад и прошедшую жёсткие испытания в условиях массового производства – осаждения защитных декоративных покрытий на изделия бытового назначения. Описание установки, особенностей конструктивного решения её основных узлов и систем, технологических возможностей и эксплуатационных характеристик приведены в статье [27].

Упрощённый чертёж общего вида установки и схема её вакуумно-плазменного агрегата представлены на рис. 8 и 9 соответственно. Помимо обычных, ставших уже "стандартными", технологий, реализуемых с помощью известных вакуумно-дуговых установок, установка Булат-9 позволяет осуществлять ряд технологических процессов модифицирования поверхности изделий, которые на серийных машинах затруднены или практически невозможны. К ним относятся: упрочнение с помощью нитридных композиционных покрытий мелкоразмерного инструмента (сверла диаметром  $\sim 1$  мм, зубные боры); нанесение покрытий на внутренние поверхности инструментов из сталей с низкой температурой отпуска (плашки, фильеры); нанесение износостойких покрытий на детали машин с температурой отпуска 250–280 °С (детали топливной аппаратуры из сталей и сплавов типа ХВГ, 40Х); получение бескапельных покрытий с применением плазменного фильтра; азотирование поверхности на глубину 30–50 мкм при температуре 300–500 °С; создание сложных, принципиально новых, типов покрытий и композиций модифицированием поверхности (азотированием) с последующим послойным нанесением проводящих и/или диэлектрических покрытий.

В установке «Булат-9» применён ряд технических решений, нетрадиционных для вакуумно-дуговых машин аналогичного назначения: Это, прежде всего, камера колпачного типа, что позволило промывать её внутренние поверхности и элементы содержащейся в ней оснастки сухим горячим азотом (или аргоном) при загрузке и выгрузке обрабатываемых изделий со стороны днища. Горячий газ, заполняющий пространство под колпаком камеры и будучи легче окружающего атмосферного воздуха, препятствует проникновению последнего в камеру. Таким образом, исключается попадание атмосферной влаги в камеру, что способствует значительному сокращению достижения рабочего вакуума перед началом цикла вакуумно-плазменной обработки изделий.

Установка содержит систему автоматической загрузки изделий в камеру и выгрузки их из камеры. В систему входит днище, перемещаемое по вертикали с помощью подъёмника, и два стола горизонтальной подачи изделий на днище. В установке использованы усовершенствованные вакуумно-дуговые источники плазмы, включая источник с плазменным фильтром. Для подавления микродуг на поверхностях обрабатываемых изделий служит система колебательных LC-контуров. Управление технологическим циклом, включая процессы откачки камеры, выгрузки и загрузки изделий, весь процесс ионно-плазменной обработки (очистка ионной бомбардировкой, электронный нагрев изделий, азотирование, осаждение покрытия) осуществляются автоматически. Перечисленный комплекс технических решений определил уникальность установки, как по конструктивному исполнению, так и по производительности, энергетической экономичности, по технологическим возможностям и гибкости перестройки с одного технологического процесса на другой, по простоте обслуживания. Полная автоматизация установки позволяет обслуживать её персоналом средней квалификации и использовать в качестве составной части линий по производству инструментов, прецизионных деталей машин, декоративных изделий и т.п. Возможности и технические решения, заложенные в установке, наиболее полно могут быть реализованы при компьютерном управлении. По эксплуатационным качествам установка остается непревзойденной, а по концепции конструктивного исполнения – новой, хотя и создана более двух десятилетий назад. По мнению авторов, ряд технических решений, использованных в «Булате-9» целесообразно применить при создании новых установок для вакуумно-дугового осаждения покрытий и других видов ионно-плазменной обработки материалов.

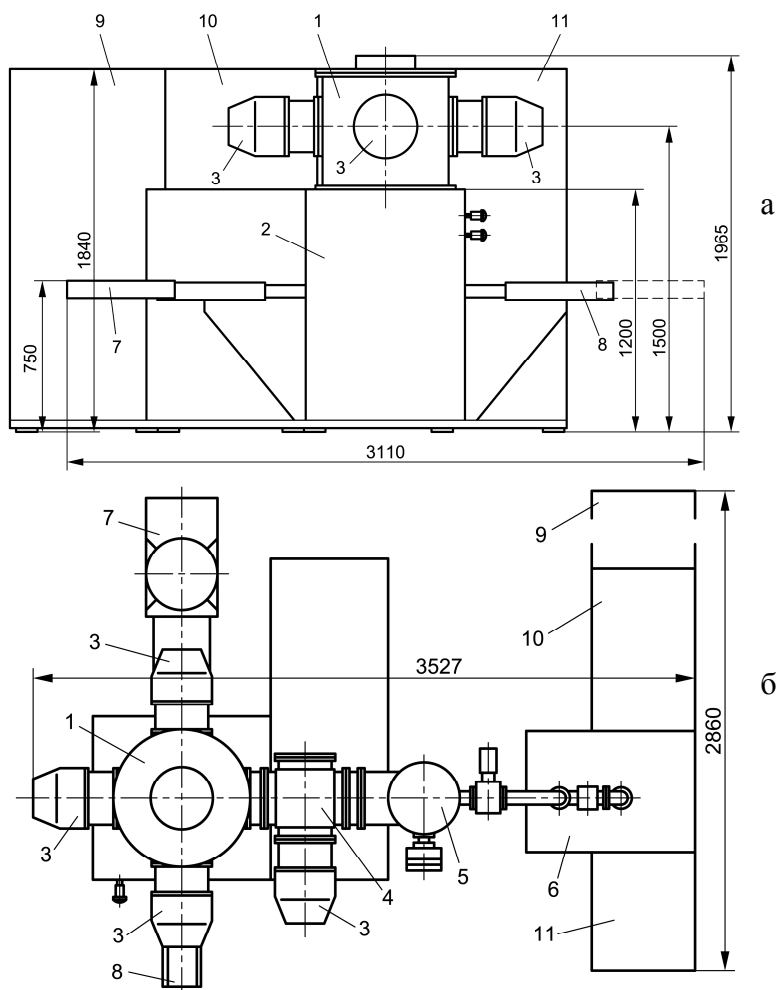


Рис. 8. Установка Булат-9.

Вид спереди (а), вид сверху (б): камера (1), подставка (2), источник плазмы (3), плазменный фильтр (4), диффузионный насос (5), форвакуумный насос (6), стол загрузки (7), стол выгрузки (8), стойка управления (9), источник питания вакуумных дуг (10), источник отрицательного напряжения смещения на подложке (11) [27]

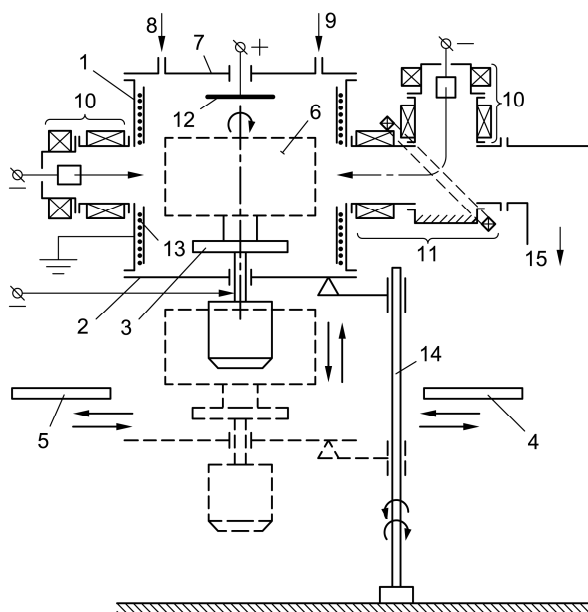


Рис. 9. Схема вакуумно-плазменного агрегата установки Булат-9:

вакуумная камера (1), днище (2), платформа (3), столы загрузки и выгрузки (4, 5), обрабатываемые изделия (6), крышка (7), подача рабочих газов (8, 9), катушки плазменного источника (10), плазменный фильтр (11), анод тлеющего разряда (12), нагреватель (13), подъёмник (14), к системе откачки (15) [27]



### Концептуальная модель установки с СФРП

На базе СФРП разработан концептуальный проект технологической установки для формирования композитных покрытий осаждением из смешанного двухкомпонентного потока плазмы. Схема её вакуумно-плазменного агрегата показана на рис. 10. В связи с осевой симметрией СФРП представилось целесообразным избрать куполообразный вариант рабочей камеры установки. Камера имеет цилиндрическую форму с вертикальной осью, выполнена из нержавеющей немагнитной стали и состоит из двух частей: нижней, стационарной, части и верхней, подвижной, части, перемещение которой вверх и вниз осуществляется с помощью подъёмника с электроприводом.

Во время загрузки камеры подвижная часть находится в верхнем положении, открывая свободный доступ к устройству карусельного или иного типов, на котором устанавливаются изделия, подлежащие обработке. Во время рабочего цикла (откачка, прогрев, ионная очистка, осаждение покрытия, ионно-плазменное модифицирование, остывание изделий) верхняя часть камеры опущена и через резиновый уплотнитель герметически соединена с нижней частью. К днищам обеих частей камеры через центральные проёмы с помощью скользящих уплотнительных узлов пристыкованы вакуумно-дуговые источники плазмы (испарители). Детально источники плазмы описаны в работах [3].

На боковой поверхности подвижной части камеры размещены отклоняющие катушки для коррекции диаграммы направленности выходного потока плазмы [3]. Расходящийся радиальный осесимметричный (веерообразный) выходной поток обуславливает целесообразность использования установки для осаждения покрытий на изделия, которые могут быть размещены вокруг кольцевого выходного зазора между анодами плазменных источников в гнездах карусели или подложкодержателя другого типа. Такими изделиями могут быть инструменты типа свёрл, метчиков, фрез, и т. п., лопатки турбин, поршни плунжерных пар и другие виды деталей машин и приборов, в том числе элементы точной механики, оптики, электроники.

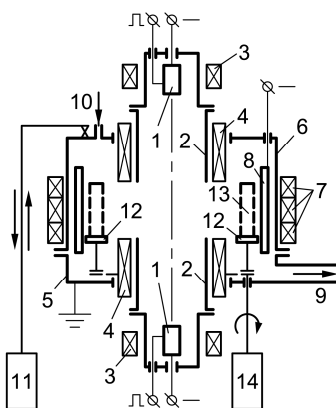


Рис. 10. Схема установки с СФРП (вариант 1)

катоды (1), аноды (2), стабилизирующие катушки (3), фокусирующие катушки (4), неподвижная (5) и подвижная (6) части рабочей камеры, отклоняющие катушки (7), экран (8), к системе откачки (9), напуск газа (10), подъёмник (11), Карусельный подложкодержатель (12), обрабатываемые изделия (13), привод карусели (14) [28]

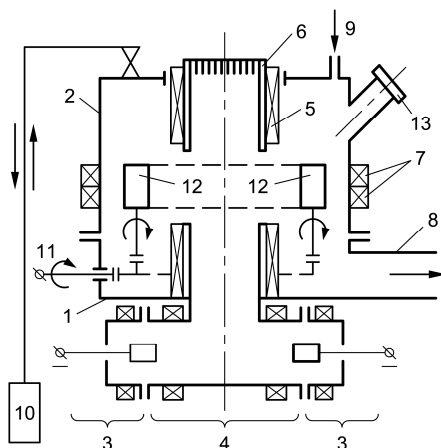


Рис. 11. Схема установки с СФРП (вариант 2)

Неподвижная (1) и подвижная (2) части рабочей камеры, источники плазмы (3), Т-образный фильтр (4), отражающая катушка (5), антианод-ловушка (6), отклоняющие катушки (7), к откачной системе (8), напуск газа (9), подъёмник (10), привод карусели (11), обрабатываемые изделия (12), смотровое окно (13)

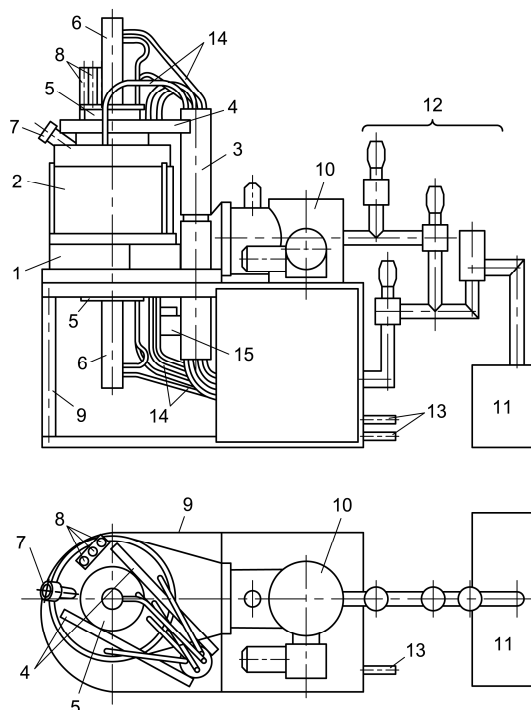


Рис. 12. Общий вид установки с СФРП.

Неподвижная (1) и подвижная (2) части рабочей камеры, подъёмник (3), подвесные штанги (4), корпуса источников плазмы (5), токовводы (6), смотровое окно (7), датчики вакуумметра (8), станина (9), высоковакуумный насос с затвором (10), форвакуумный насос (11), система форвакуумных клапанов (12), ввод и вывод охлаждающей воды (13), шланги системы охлаждения (14) [28]

На рис.11 представлена схема второго концептуального варианта конструкционного решения технологической установки с СФРП. Здесь вместо нижнего безфильтрового источника использована система с двумя источниками 3, состыкованными с общим Т-образным фильтром 4. Более подробно система описана выше и изображена на рис. 9. Вместо верхнего источника плазмы здесь установлен полый цилиндрический электрод 6 (антианод) с отражающей катушкой 5. Электрод 6 с оребрённой донной (торцевой) поверхностью служит ловушкой МЧ. Включаемые встречно по отношению друг к другу катушка 5 антианода-ловушки и катушка выходного плазмоведа фильтра 4 служат для формирования остроугольного магнитного поля для вывода суммарного выходного плазменного потока через кольцевой зазор между выходным плазмоводом и электродом 6 на обрабатываемые изделия 12. Упрощённый чертёж установки с СФРП представлен на рис. 12.

## ПРОЕКТИРУЕМАЯ УСТАНОВКА БУЛАТ-10

### Общие сведения

С учётом опыта длительной и интенсивной эксплуатации в лабораторных и производственных условиях двух экспериментальных образцов установки Булат-9 разрабатывается проект установки Булат-10, в котором при сохранении основной концепции установки-прототипа осуществлен ряд конструктивных изменений. Вакуумно-дуговая автоматизированная установка «Булат-10» предназначена для синтеза твердых, высокопрочных и сверхтвердых материалов (карбидов, нитридов, оксидов, композитов) и нанесения их в виде микро- и наноструктурированных в том числе и многослойных функциональных покрытий: износостойких, коррозионно- и эрозионностойких, декоративных, тепло- и электропроводящих и др. Предполагается использование установки в производстве инструментов, в машино- и приборостроении, в электронике, точной механике, оптике, медицине и др.

Общий вид новой модификации установки показан на рис. 13. Внесенные в конструкцию установки изменения направлены на повышение её производительности и надежности, на упрощение обслуживания. В установке «Булат 10», как и в «Булат-9», применён ряд технических решений, нетрадиционных для вакуумно-дуговых машин аналогичного назначения: Это, прежде всего, куполообразная камера, что позволило промывать её внутренние поверхности и элементы содержащейся в ней оснастки сухим горячим азотом (или аргоном) при загрузке и выгрузке обрабатываемых изделий со стороны днища. В то же время камера снабжена боковой дверью, используемой в процессе регламентных работ. В боковой стенке камеры имеется два окна для размещения датчика ИК-пирометра и/или ввода термпары (не показаны). Внутренние размеры камеры: высота составляет 1050 мм, поперечный размер – 900 мм. В подставке 2 под камерой размещены электроприводы для управляемого перемещения столов горизонтальной подачи и вертикального перемещения днища (не показаны). В зависимости от конкретного назначения установки камера может быть оснащена либо четырьмя, либо двумя

источниками плазмы (базовая модель, рис. 13), либо двумя системами, каждая из которых состоит из двух источников плазмы и общего для них Т-образного фильтра (рис. 14), либо системой из Т-образного фильтра, к каждому плечу которого подсоединены по два источника плазмы (рис. 15). Откачка камеры осуществляется через L-образный фильтр с двумя источниками плазмы (поз. 4 на рис. 13). В зависимости от материала катодов этих источников через фильтр в камеру поступает поток фильтрованной плазмы соответствующего состава. В случае, если катоды выполнены из титана, рассматриваемая система при отключенном питании магнитных катушек фильтра может выполнять функции электродугового сорбционного насоса.

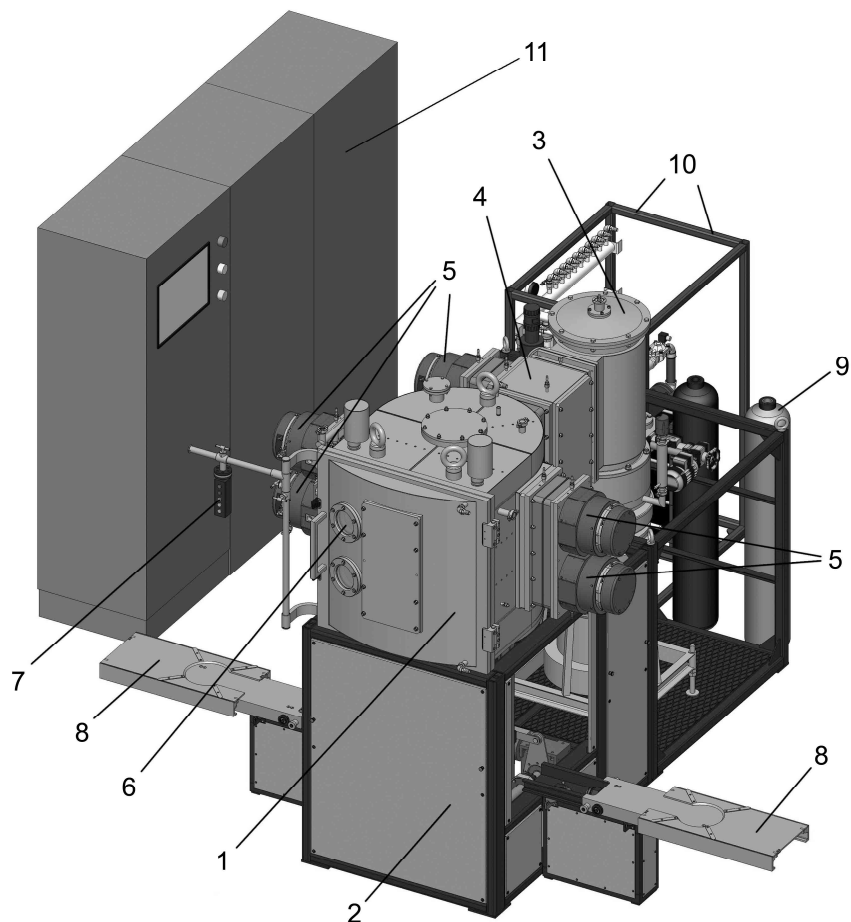


Рис. 13. Базовая модель установки Булат-10

1 – камера, 2 – подставка, 3 – система вакуумной откачки; 4 – фильтр L-образный, 5 – вакуумно-дуговые генераторы плазмы, 6 – смотровое окно, 7 – пульт ручного управления системой загрузки – выгрузки, 8 – стол горизонтальной подачи, 9 – баллоны с рабочими газами, 10 – система водоснабжения, 11 – шкаф электропитания и управления.

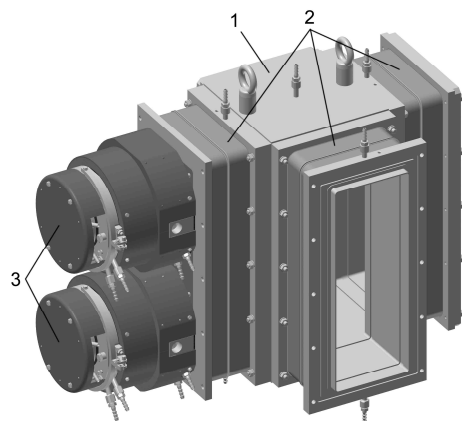


Рис. 14. Т-образный фильтр с двумя источниками плазмы  
1 – корпус фильтра, 2 – электромагнитные катушки, 3 – источники плазмы

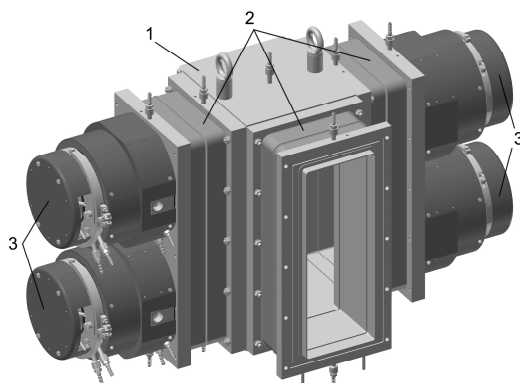


Рис. 15. Т-образный фильтр с четырьмя источниками плазмы  
 1 – корпус фильтра, 2 – электромагнитные катушки, 3 – источники плазмы

### Технические характеристики

1. Количество источников плазмы, шт.....	6
2. Максимальная площадь поверхности напыления, дм <sup>2</sup> .....	115
3. Максимальные размеры обрабатываемых изделий, мм	
диаметр.....	700
высота.....	540
4. Число оборотов шпинделя устройства поворотного, об./мин.....	7,5
5. Допустимая нагрузка на шпиндель устройства поворотного, кг.....	до 150
6. Предельный вакуум в рабочей камере, Па (мм рт. ст.), не более.....	$6,5 \cdot 10^{-3} (5 \cdot 10^{-5})$
7. Рабочее давление в камере, Па (мм рт. ст.).....	от $6,5 \cdot 10^{-3} (5 \cdot 10^{-5})$ до $6,5 \cdot 10^{-1} (5 \cdot 10^{-3})$
8. Время откачки камеры до давления $6,5 \text{ Па} (5 \cdot 10^{-2} \text{ мм рт.ст.})$ , мин.....	4
9. Время откачки камеры до давления $6,5 \cdot 10^{-3} \text{ Па} (5 \cdot 10^{-5} \text{ мм рт.ст.})$ , мин.....	8
10. Охлаждение – водяное	
11. Максимальная потребляемая электрическая мощность, кВт, не более.....	55
12. Напряжение питания, В.....	$380/220 \pm 10\%$
13. Частота напряжения питания, Гц.....	$50 \pm 1$
14. Ток дуги, А.....	до 150
15. Возбуждение и поддержание дугового разряда.....	автоматическое
16. Напряжение холостого хода выпрямителя ионной бомбардировки (источника отрицательного напряжения смещения на подложке), регулируемое, ( $\pm 10\%$ ) кВ.....	от 0,1 до 1,1

Шкаф электропитания и управления 11 содержит:

- источники питания и управления вакуумно-дуговыми генераторами плазмы,
- источники питания электромагнитных катушек плазменных фильтров,
- источник отрицательного напряжения смещения на подложке (выпрямитель),
- систему напуска рабочих газов в камеру,
- систему контроля температуры обрабатываемых изделий в процессе нанесения покрытий,

В проектируемой установке, как и в установке-прототипе, предусматривается система автоматического управления всем технологическим циклом, начиная от загрузки в камеру кассеты с изделиями, подлежащими обработке, до её выгрузки.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из анализа литературных данных и описания разработок ХФТИ следует, что в отношении способности получения однородных по составу и толщине композитных микро- и наноструктурированных покрытий наиболее перспективными являются плазменные источники с широкоапертурными одно- и двухканальными системами фильтрации с остроугольной и пробочной геометрией транспортирующих магнитных полей. При разработке нового оборудования, оснащённого такими системами, целесообразно в качестве прототипа использовать установку типа Булат-9, которая по производительности, широте технологических возможностей и эргономическим характеристикам является непревзойдённой с момента создания до настоящего времени. В работе кратко изложены основные концептуальные данные по проектируемой установке рассматриваемого типа.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРЫ

1. Reshetnyak Ye. N. Strel'nitskiy V.E. Sb. Sintez uprochnyayushchich nanostrukturnykh pokrytiy // Problems of atomic science and technology. Ser. Fizika radiatsionnykh povrezhdeniy i radiatsionnogo materialovedeniya. – 2008. – No.2(92).– P. 119-130.
2. Anders A. Cathodic Arcs: From Fractal Spots to Energetic condensation. – Springer Series on Atomic, Optical and Plasma Physics, 2008. – 540 p.
3. Aksenov I.I. Vakuumnaya duga v trozionnykh istochnikakh plazmy. – Kharkov: NNTs KFTI, 2005. – 212p.
4. Aksenov I.I., Andreev A.A., Belous V.A., Strel'nitskiy V.E., Khoroshikh V.M. Vakuumnaya duga: istochniki plazmy, osazhdenie pokrytiy, poverkhnostnoye modifitsirovaniye. – Kiev: Naukova Dumka, 2011. – 724 p.
5. Jilek M., Cselle T., Holubar P., Morstein M., Veprek-Heijman M.G.J., Veprek S. Development of Novel Coating Technology by Vacuum Arc with Rotating Cathodes for Industrial Production of nc-(Al<sub>1-x</sub>Ti<sub>x</sub>)N/a-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Superhard Nanocomposite Coatings for Dry, Hard Machining // Plasma Chemistry and Plasma Processing. –2004.– Vol. 24.– No.4.– P. 493-510.
6. Zhitomirsky V.N., Boxman R.L., Goldsmith S., Grimberg I., Weiss B.Z. Superposition of two plasma beams produced in a vacuum arc deposition apparatus // Proc. of XVIIIth ISDEIV, Eindhoven, 1998. – P. 609-612.
7. Ben-Ami R., Zhitomirsky V.N., Boxman R.L., and Goldsmith S. Superposition of two plasma beams produced in a vacuum arc deposition apparatus // Plasma Sources Sci. Technol. – 1999.– Vol. 8.– P. 355–362.
8. Mukhin V.S., Budilov V.V., Shekhtman S.R., Kireev R.M. Nanostructured protective coatings. Kharkov nanostructural assembly. Vacuum nanotechnologies and equipment. – Kharkov: 2006.– P. 205-209.
9. Kunchenko Yu.V., Kunchenko V.V., Neklyudov I.M., Kartmazov G.N., Andreev A.A. Sloistye Ti-Cr-N-pokrytiya poluchayemye metodom vakuumno-dugovogo osazhdeniya // VANT, ser. Fizika radiatsionnykh povrezhdeniy i radiatsionnogo materialovedeniya. – 2007. – No.2 (90). – P. 203-214.
10. Xing-zhao Ding, Zeng X.T., Liu Y.C., Fang F.Z., Lim G.C. Cr<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>N coatings deposited by lateral rotating cathode arc for high speed machining applications // Thin Solid Films.– 2008.– Vol. 516. – P. 1710-1715.
11. Anders A., Pasaja N., Sansongsiri S. Filtered cathodic arc deposition with ion-species-selective bias // Review of scientific instruments. – 2007. – Vol. 78 – P. 1-5.
12. Anders S., Raoux S., Krishnan K., MacGill R.A., Brown I.G. Plasma distribution of cathodic arc deposition systems // J. Appl. Phys. – 1996. – Vol. 79. – No.9. – P.6785-6790.
13. Bilek M.M.M, Anders A., Brown I.G. Magnetic system for producing uniform coatings using a filtered cathodic arc // Plasma Sources Sci. Technol. – 2001. Vol.10. – P. 606–613.
14. Dai Hua, Shen Yao, Wang Jing, Xu Ming, Li Liuhe, Li Xiaoling, Cai Xun, and Chu Paul K. Fabrication for multilayered composite thin films by dual-channel vacuum arc deposition // Review of scientific instruments. – 2008. - Vol. 79. – P. 065104-1 – 065104-5]
15. Int. Appl. No. PCT/IB98/01794 published under PCT No. WO 99/223396, October 24, 1997.
16. Takikawa Hirofumi, Tanoue Hideto. Review of cathodic arc deposition for preparing droplet-free thin films // IEEE Trans. on Plasma Sci. – 2007.– Vol. 35 – No. 4 – P. 992-999.
17. Takayuki Mashiki, Hiroki Hikosaka, Hideto Tanoue, Hirofumi Takikawa, Yushi Hasegawa, Makoto Taki, Masao Kumagai, Masao Kamiya. TiAlN film preparation by Y-shape filtered-arc-deposition system // Thin Solid Films. – 2008.– Vol. 516. – P. 6650–6654.
18. US Patent No.: US 6,663,755 B2. Dec. 16, 2003.
19. Aksenov I.I., Strel'nitskiy V.E., Vasilyev V.V., Zaleskiy D.Yu. Efficiency of magnetic plasma filters // Surf. Coat. Technol. – 2003. – Vol. 163-164.– P.118-127.
20. Arsenov I.I., Kuprin A.I., Lovino N.S., Ovcharenko V.D., Sobol O.V. Ocazhdenie nanostrukturnykh pokrytij iz dvukhkomponentnykh potokov filtrovannoi vakuumno-dugovoi plazmy // Kharkovskaya nanotekhnologicheskaya assamblyta. T.1, “Vakuumnye tekhnologii i oborudovaniye, Kharkov, 2006”. – P. 173-178.
21. Kuprin A.I, Tolvachova G.N. Termicheskaya stabilnost mnogokomponentnykh nanostrukturnykh plyonok, osazhdyonnykh vakuumno-dugovym metodom // Sb. Trudov III mezhdunarodnoj konf. Fiziko-khimicheskie osnovy forvirovaniya I modifikatsii mikro- i nanostruktur, Kharkov, Ukraina, 2009. – P.193-195.
22. Aksenov I.I, Aksyonov D.S., Vasilyev V.V., Luchaninov A.A., Reshetnyak Ye.N., Strel'nitskiy V.E. Vakuumno-dugovye istochniki plazmy s dvukhkanal'nym magnitnyv fil'trom // Kharkovskaya nanotekhnologicheskaya assambleya. T.1, “Vakuumnye tekhnologii i oborudovaniye, Kharkov, 2008”. – P. 257-265.
23. Aksyonov D.S., Aksenov I.I., Luchaninov A.A., Reshetnyak E.N., Strel'nitskiy V.E. Synthesis of Ti-Si and Ti-Si-N coatings by condensation of filtered vacuum-arc plasma // VANT, ser. Vakuum, chistye materialy, sverkhprovodniki. – 2009. – No.6 (18).– P. 268-272.
24. US Patent No. US 7,381,311. Jun. 3, 2008.
25. Aksenov I.I., Aksyonov D.S., Vasilyev V.V., Luchaninov A.A., Reshetnyak E.N., Strel'nitskiy V.E. Two-Cathode Filtered Vacuum Arc Plasma Source // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2009 – Vol. 37. – No.8. – P.1511-1516.
26. Aksyonov D.S., Aksenov I.I., Luchaninov A.A., Reshetnyak E.N., Strel'nitskiy V.E. Deposition of Ti-Al-N Coatings Using Two-Channel T-Shaped Magnetic Filter // Proc. of XXIVth ISDEIV, Braunschweig, Germany, 2010. – P.494 – 496.
27. Aksenov I.I, Belous V.A. Vysokoproizvoditel'naya vakuumno-dugovaya ustanovka dlya osazhdeniz pokrytij // VANT, ser. Fizika radiatsionnykh povrezhdeniy i radiatsionnogo materialovedeniya. – 2008. – No.2 (92). – P.108-118.
28. Aksyonov D.S., Aksenov I.I., Belous V.A., Strel'nitskiy V.E. Kontseptual'nye modeli vakuumno-dugovykh ustanovok dlya formirovaniya pokrytij iz mikro- i nanostrukturirovannykh kovpozitnykh materialov // Materialy XVII mezhdunarodnoj nauchno-technitsheskoj konferentsii “Vysokiye tekhnologii v promyshlennosti Rossii”, Moskva, Rossiya, 2011.