

**ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННАЯ УСТАНОВКА ПОВЫШЕННОЙ
ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ДЛЯ ЗАЩИТНО-УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ
ДЕТАЛЕЙ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ**

A VACUUM-PLASMA UNIT WITH IMPROVED EFFICIENCY FOR PROTECTION-
STRENGTHENING PROCESSING OF MACHINERY AND EQUIPMENT ELEMENTS

**Н. К. Криони, А. В. Новиков, А. Д. Мингажев, Р. К. Давлеткулов, А. А. Мингажева,
В. А. Гафарова**

N. K. Krioni, A. V. Novikov, A. D. Mingazhev, R. K. Davletkulov, A. A. Mingazheva,
V. A. Gafarova

Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа,

ООО «ПП Турбинаспецсервис», г. Уфа,

Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа

*Ключевые слова: вакуумно-плазменное нанесение покрытий; электродуговое испарение;
уменьшение капельной фазы; снижение расхода материалов и энергозатрат*

*Key words: vacuum-plasma application of coating; electric-arc evaporation; drop phase reduction;
reduction of materials and energy resources consumption*

Повышение эффективности работы, ресурса и надежности деталей машин, в том числе работающих в узлах трения, является одной из важнейших задач современного ресурсосбережения. Известно, что в процессе эксплуатации деталей материал поверхностного слоя подвержен наиболее интенсивным воздействиям, приводящим к ухудшению эксплуатационных свойств и выходу из строя машины в целом. В этой связи исследования и разработки в области обеспечения повышенной износостойкости деталей машин направлены на изменение структуры и свойств поверхностного слоя путем использования новых высокоэнергетических методов обработки и создания на их основе технологий, обеспечивающих высокие триботехнические характеристики поверхностей деталей.

В настоящее время существует множество технологий защитно-упрочняющей обработки поверхностей и нанесения износостойких покрытий, например лазерное упрочнение, наплавка, получение регулярного микрорельефа, азотирование, ионно-плазменные и газотермические покрытия и т. д. Тенденции развития современных технологий упрочнения деталей, особенно наиболее ответственных деталей современной техники, показывают, что ионно-плазменные технологии нанесения покрытий, совмещенные с использованием эффективных высокоэнергетических методов упрочнения поверхности, являются одними из наиболее перспективных. При этом существующее мнение о дороговизне использования этих методов для широкого круга деталей не всегда обоснованы, поскольку простое увеличение количества одновременно обрабатываемых деталей в одной установке, позволяет снизить затраты. Одним из основных недостатков известных вакуумно-плазменных технологий нанесения покрытий является наличие в осажденном материале покрытия капельной фазы, которая приводит к ухудшению их качества. Поэтому для обеспечения высоких триботехнических характеристик деталей машин и оборудования путем использования комплексных ионно-плазменных методов упрочняющей обработки и нанесения покрытий необходимо создание технологий и вакуумно-плазменных установок, которые позволяют обеспечить высокую производительность и равномерность обработки деталей за счет рацио-

нального использования объема рабочей камеры, нанесение упрочняющих покрытий с минимальным содержанием капельной фазы путем улучшения условий испарения материалов.

Широко известны способы и установки для нанесения защитных покрытий путем осаждения из вакуумно-дуговой плазмы материала покрытия с использованием электродуговых испарителей металлов, содержащих катод, выполненный из испаряемого материала и имеющий поверхность испарения и источник постоянного тока, соединенный с катодом и анодом [1]. Используемые в таких установках катоды, выполненные из материала покрытия, используются, как правило, для испарения токопроводящих материалов и нанесения упрочняющих покрытий ограниченной толщины на детали машин из плазмы испаряемого материала [2]. Недостатком электродуговых испарителей, используемых на установках для нанесения покрытий указанного типа, является ограниченный запас испаряемого материала, а также низкая производительность, что не позволяет наносить защитные покрытия большой толщины (порядка 20–40 мкм) на детали машин в одном цикле напыления.

Для нанесения упрочняющих покрытий применяют электродуговые испарители [3], выполненный из испаряемого материала цилиндрический охлаждаемый катод, снабженный средствами фиксации положения катодного пятна на поверхности испарения катода. Применение магнитных фиксаторов катодного пятна позволяет управлять положением и параметрами катодного пятна и тем самым снизить количество капельной фазы в покрытии.

Для нанесения износостойких покрытий с пониженным содержанием капельной фазы используются вакуумные установки с вытянутыми вдоль своей продольной оси электродуговыми испарителями металлов [4]. Обеспечение в них интенсивного движения области катодных пятен приводит к снижению интенсивности образования капельной фазы. Однако известные электродуговые испарители не обеспечивают стабильного и надежного процесса ионно-плазменной обработки и постоянства геометрических параметров области испарения материала катода и скорости ее перемещения.

Технология нанесения ионно-плазменных износостойких покрытий [5] с использованием установки с центральным расположением цилиндрического катода с магнитным фиксатором области испарения обеспечивает равномерные и стабильные условия обработки деталей. Однако формирование области катодных пятен в виде кольца, вокруг возвратно-поступательно перемещающегося цилиндрического катода, вызывает интенсивное образование капельной фазы. Это связано с тем, что при нанесении покрытий испаритель работает при высокой концентрации энергии в катодном пятне дуги, происходит интенсивный локальный перегрев поверхностного слоя материала катода, приводящий к его чрезмерному расплавлению и разбрызгиванию (рис. 1). При этом для испарения материала используется сравнительно небольшой участок катода, что снижает рабочую зону нанесения покрытия на детали и приводит к разнотолщинности покрытия, связанной с различной интенсивностью осаждения материала по высоте детали (распыление материала в радиальном направлении от цилиндрического катода идет в форме струи, и количество осаждаемого материала снижается от центральной ее части к периферии). Кроме того, такая технология нанесения покрытий приводит к нерациональному использованию объема камеры и, как следствие, к снижению производительности установки.

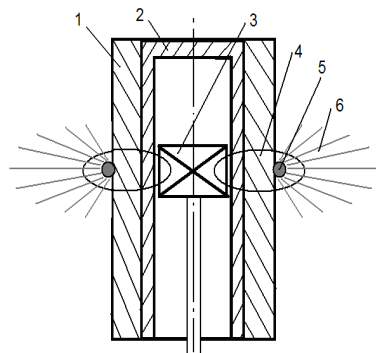


Рис. 1. Схема распыления материала, образующего покрытие, приводящая к интенсивному образованию капельной фазы:

- 1 — катод, выполненный из испаряемого материала в виде цилиндрической обечайки;
- 2 — охлаждаемый катододержатель;
- 3 — магнитный фиксатор области катодных пятен; 4 — магнитное поле;
- 5 — зона испарения материала катода;
- 6 — поток испаренного материала

Таким образом, наиболее удачными схемами выполнения установок с электродуговыми испарителями являются варианты.

1. Выполнение рабочей камеры установки в виде цилиндрической обечайки.
2. Расположение испаряемого материала в виде цилиндрического катода в центральной части на одной оси с осью рабочей камеры установки.

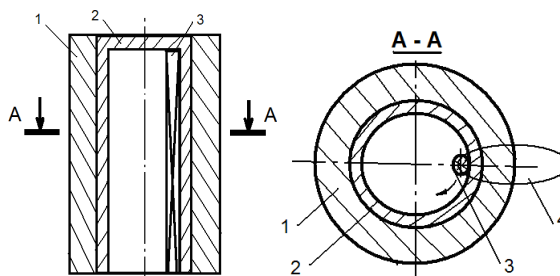
3. Равноудаленное расположение обрабатываемых деталей от распыляемого металла.
4. Интенсивное перемещение области катодных пятен по поверхности испаряемого материала катода, обеспечивающего минимальное образование капельной фазы.
5. Обеспечение интенсивного охлаждения катода.
6. Максимальное полезное использование объема рабочей камеры установки.

Отсутствие установок и технологий нанесения износостойких покрытий, обеспечивающих приведенные выше характеристики, послужило причиной разработки авторами новой технологии нанесения покрытий и вакуумно-плазменной установки для ее обеспечения.

Разработка технологии и установки для нанесения покрытий. Поскольку существующие на сегодняшний день вакуумно-плазменные установки не в полной мере соответствуют приведенным выше требованиям, то возникла потребность в разработке установок нового поколения, характеристики которых позволили бы обеспечить новое качество обрабатываемых деталей. Для решения поставленной задачи авторами была сделана попытка создания новой установки, а также технологии нанесения покрытий, включающей следующие операции: размещение деталей в вакуумной камере, приложение к деталям потенциала электрического смещения, ионную очистку поверхности деталей и нанесение на них покрытия электродуговым испарением материалов катода, выполненного в виде цилиндрической обечайки и снабженного магнитным фиксатором области катодных пятен. Особенностью технологии является то, что фиксатор катодных пятен выполнен с возможностью обеспечения области образования катодных пятен в виде полосы, ориентированной вдоль продольной оси цилиндрической обечайки катода и перемещающейся по траектории, коаксиальной окружности цилиндрической обечайки катода с сохранением своей ориентации (рис. 2).

Рис. 2. Схема распыления материала, образующего покрытие, с минимальным образованием капельной фазы:

- 1 — катод, выполненный из испаряемого материала в виде цилиндрической обечайки; 2 — охлаждаемый катододержатель; 3 — магнитный фиксатор области катодных пятен; 4 — магнитное поле



Другой особенностью является то, что возвратно-поступательное перемещение области катодных пятен полосы осуществляют за счет переключения полярности противоположных торцов катода (рис. 3).

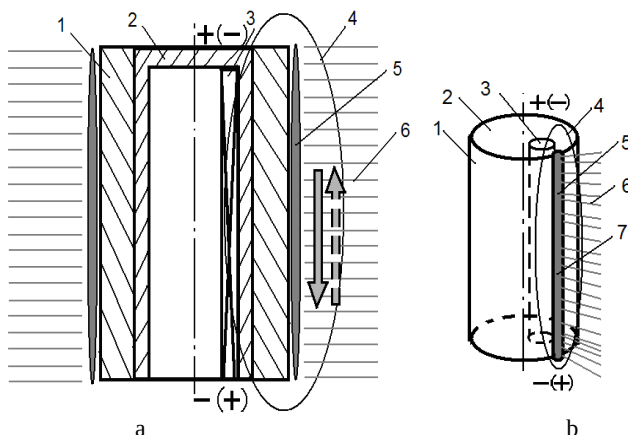


Рис. 3. Схема распыления материала, образующего покрытие, обеспечивающая распыление со всей поверхности катода при минимальном образовании капельной фазы:

- a — катод с магнитным фиксатором в разрезе; b — пространственный вид катода с магнитным фиксатором; 1 — катод, выполненный из испаряемого материала в виде цилиндрической обечайки; 2 — охлаждаемый катододержатель; 3 — магнитный фиксатор области катодных пятен; 4 — магнитное поле; 5 — зона испарения материала катода; 6 — поток испаренного материала

Новая технология нанесения и установка обеспечивают следующие характеристики процесса:

- центральное расположение катода в вакуумной камере;
- скорость перемещения полосы по траектории, коаксиальной окружности цилиндрической обечайки катода от 0,2 до 30 м/с;
- при нанесении покрытий детали вращают вокруг собственной оси и перемещают относительно катода;
- после ионной очистки проводят ионно-имплантационную обработку поверхности детали, причем ионную очистку проводят ионами Ag и/или N при энергии от 8 до 10 кэВ, плотности тока от 90 до 300 мкА/см² в течение 0,2–0,5 ч, затем проводят ионную имплантацию ионами одного или нескольких элементов N, Yb, Y, Cr, при энергии от 25 до 60 кэВ, дозой от $1,6 \cdot 10^{17}$ до $5 \cdot 10^{17}$ см⁻², со скоростью набора дозы от $0,7 \cdot 10^{15}$ до $1 \cdot 10^{15}$ с⁻¹; в качестве материала покрытия используют нитриды Me-N, карбиды Me-C и карбо-нитриды Me-NC, где Me-Ti, Zr, Al, W, Mo, TiZr, TiAl, TiAlZr, TiAlZrMo или их сочетание, N — азот, C — углерод;
- при нанесении покрытия обеспечивают параллельность осей вращения деталей с осью катода; используют катод, выполненный из одного из следующих металлов: Ti, Zr, Cr, Al и др. материалы и сплавы, образующие износостойкие покрытия;
- нанесение покрытия производят в среде реакционного газа, в качестве которого используют азот и/или углерод при давлении $10^{-5} \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст.;
- используют цилиндрический катод с размерами в диапазонах: высота — от 200 до 3 000 мм, внешний диаметр — от 200 до 600 мм, толщина стенки катода — от 10 до 80 мм, причем ширину упомянутой полосы области образования катодных пятен выбирают от 5 до 40 мм.

Электродуговой испаритель для нанесения покрытий содержит охлаждаемый катод, выполненный из испаряемого материала в виде цилиндрической обечайки, снабженный средствами подвода — отвода охлаждающей среды, средствами электрической связи катода с источником электропитания разряда, с расположенным внутри катода магнитным фиксатором положения области катодных пятен. При этом фиксатор выполнен с возможностью образования катодных пятен в виде полосы, ориентированной вдоль продольной оси цилиндрической обечайки катода и с возможностью перемещения полосы по траектории, коаксиальной окружности цилиндрической обечайки катода с сохранением своей ориентации. Средства электрической связи катода с источником электропитания разряда выполнены в виде токоподводов с противоположных торцов катода, подключенных к управляемым ключам, электрически связанным через индивидуальные элементы включения с блоком управления и соединенным с источником постоянного тока, соединенным также с анодом. При этом возможны следующие варианты испарителя: магнитный фиксатор положения области катодных пятен может быть выполнен в виде протяженного стержня, расположенного эксцентрично продольной оси цилиндрической обечайки катода, выполненной с возможностью перемещения по окружности с центром, расположенным на оси цилиндрической обечайки катода. Перемещение магнитного фиксатора по окружности с центром, расположенным на оси цилиндрической обечайки катода, обеспечивается коленчатым или эксцентриковым валом. Магнитный фиксатор положения области катодных пятен выполнен в виде расположенных по периферии катода магнитных катушек. Катушки могут работать в режиме последовательного включения с выключением предыдущей магнитной катушки.

Управляемость положением области катодных пятен определяется величиной магнитного поля: чем больше напряженность магнитного поля, тем выше управляемость. В разработанном варианте испарителя управление областью катодных пятен (или областью испарения материала катода) обеспечивается за счет нескольких приемов.

Первый прием заключается в создании области образования катодных пятен в виде полосы, ориентированной вдоль продольной оси цилиндрической обечайки катода. Поскольку магнитное поле фиксатором положения области катодных пятен создается в виде полосы, то и область испарения материала катода также формируется подобно ей, в виде той же самой полосы на катоде. При этом полоса на катоде расположена вдоль продольной оси обечайки катода (вдоль образующей цилиндрической поверхности катода). Однако указанная область испарения материала катода в виде полосы, инициируемой магнитным фиксатором, не была бы стабильна, если бы не использовался второй прием — обеспечение возвратно-поступательного перемещения области катодных пятен по упомянутой полосе за счет переключения полярности противоположных торцов катода.

Второй прием позволяет управлять областью катодных пятен за счет синхронизации переключения полярности торцов катода и скорости перемещения области катодных пятен от одного торца катода до другого. Как только область катодных пятен достигает противоположного торца катода (при передвижении вдоль оси обечайки катода), происходит переключение полярности торцов катода, и область катодных пятен начинает перемещаться в обратную сторону. Скорость перемещения области катодных пятен составляет от 8 до 20 м/с. При такой скорости область испарения представляет собой сплошную полосу протяженностью от одного торца катода до другого. Однако формирование области испарения в виде полосы не позволит достичь необходимого эффекта испарения материала, поэтому используется третий прием управления областью катодных пятен — перемещение упомянутой полосы по траектории, коаксиальной окружности цилиндрической обечайки катода с сохранением своей ориентации. Скорость перемещения упомянутой полосы по траектории, коаксиальной окружности цилиндрической обечайки катода, составляет от 0,2 до 30 м/с.

В результате использования всех трех приемов управления областью катодных пятен создается значительная площадь испарения материала почти одновременно со всей поверхности катода. Это позволяет достичь двух важных результатов. Первый эффект заключается в том, что быстрая смена зоны испарения материала катода предотвращает перегрев локальных участков, что значительно уменьшает количество капельной фазы в испаренном материале катода. Как правило, использование в катодах охлаждения путем теплоотвода через стенку катода (например, водоохлаждаемый катод) недостаточно для предотвращения интенсивного расплавления металла в области действия катодных пятен (электрической дуги). В то же время охлаждение за счет скоростного подвода в зону испарения материала новой поверхности дает дополнительный эффект, снижающий процесс образования капельной фазы. При этом количество теплоты, удаляемое из области воздействия катодных пятен участка катода, достаточно для продолжения на некоторое время процесса испарения материала. Кроме того, за счет уноса теплоты испарением происходит дополнительное охлаждение этого участка катода. Второй из рассматриваемых эффектов связан со значительным увеличением области испарения материала, что приводит к повышению рабочего объема установки, а следовательно, к увеличению количества одновременно обрабатываемых деталей (повышению производительности процесса обработки).

Проведенные исследования разработанной технологии показали, что по сравнению с существующими установками и технологиями нанесения покрытий происходит повышение таких показателей, как производительность в 1,5–3 раза, уменьшение расхода испаряемого материала в 2–5 раз, уменьшение содержания капельной фазы в покрытии в 10–20 раз, повышение равномерности покрытия (в зависимости от габаритов детали) от 3 до 10 раз. Сравнительный анализ проводился с установками типа МАП-1, ННВ6И1, ВУ-2М [4, 5]. Покрытия наносились на образцы из высоколегированных сталей и сплавов на никелевой основе 20Х13, 15Х11МФ, ЭИ961; из титановых сплавов ВТ6 и ВТ9; из никелевых сплавов ЖС-6, ЖС-6У.

Режимы обработки образцов. Ионная очистка ионами Ag и/или N: при энергии 8–10 кэВ; плотность тока — 90–130 МкА/см²; время ионной очистки — 0,2–0,5 часа (У. Р.). Ионная имплантация ионами N, Yb: энергия — 25–30 кэВ; доза — $1,6 \cdot 10^{17} - 5 \cdot 10^{17}$ см⁻²; скорость набора дозы — $0,7 \cdot 10^{15} - 1 \cdot 10^{15}$ с⁻¹. Катоды были выполнены из сплавов на основе титана и никеля. Нанесение покрытия производили как в вакууме (10^{-6} – 10^{-9} мм рт. ст.), так и в среде реакционного газа, в качестве которого использовали азот и/или углерод при давлении 10^{-5} – 10^{-4} мм рт. ст. Исследование равномерности покрытий показало, что при нанесении покрытия со средним значением толщины в 60 мкм толщина по существующей технологии (установка типа МАП, АПН) находится в диапазоне от 40 до 70 мкм, в то время как разработанная технология позволяет обеспечить толщину в пределах 58–60 мкм.

Таким образом, разработанная вакуумно-плазменная установка и технология нанесения покрытий обеспечивают повышение производительности обработки деталей, значительно уменьшают количество капельной фазы в покрытиях, снижают расход материала, образующего покрытие, улучшают равномерность нанесения покрытия, что приводит к повышению качества обработки деталей машин и оборудования.

Список литературы

1. Патент США 3793179, МПК C23C 14/32, APPARATUS FOR METAL EVAPORATION COATING. 1974.
2. Патент США № 5529674, Cylindrical hollow cathode/magnetron sputtering system and components thereof. 1996.
3. Патент США 6926811, МПК C23C 14/34, «Arc-coating process with rotating cathodes». 2005.
4. А. С. СССР 461163, МПК C23C 14/32, испаритель металла в вакууме. 1975.
5. Патент США 6936145, МПК C23C 14/32, Coating method and apparatus. 2005.

Сведения об авторах

Криони Николай Константинович, д. т. н., профессор, Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа, e-mail: krioni@mail.rb.ru

Новиков Антон Владимирович, генеральный директор, ООО «Производственное предприятие Турбинаспецсервис», г. Уфа E-mail: info@turbinass.ru

Мингажев Аскар Джамилевич, к. т. н., доцент, Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, e-mail: MAD-20007@yandex.ru

Давлеткулов Раис Калимуллович, старший преподаватель, Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа

Мингажева Алиса Аскарровна, аспирант, научный сотрудник, Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа, e-mail: adventureseeker@list.ru

Гафарова Виктория Александровна, аспирант, Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, e-mail: flinchik@rambler.ru

Information about the authors

Krioni N. K., Doctor of Engineering, professor of Ufa State Aircraft Technical University, Ufa, e-mail: krioni@mail.rb.ru

Novikov A. V., General director of LC «Production enterprise Turbinaspetsservice», Ufa, e-mail: info@turbinass.ru

Mingazhev A. D., Candidate of Science in Engineering, Ufa State Petroleum Technical University, Ufa, e-mail: MAD-20007@yandex.ru

Davletkulov R. K., senior lecturer, Ufa State Aircraft Technical University, Ufa

Mingazheva A. A., postgraduate, scientific worker of Ufa State Aircraft Technical University, Ufa, e-mail: adventureseeker@list.ru

Gafarova V. A., postgraduate of Ufa State Petroleum Technical University, Ufa, e-mail: flinchik@rambler.ru