

## Обеспечение качества вакуумно-дуговых ионно-плазменных покрытий

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*

Уточнено на основе анализа процессов нанесения покрытий вакуумно-дуговыми ионно-плазменными методами разделение на основные характерные зоны, возникающие при обработке изделий. Рассмотрены и классифицированы по зонам проблемы ионно-плазменных технологий. Предложен системный подход к обеспечению качества вакуумно-дуговых ионно-плазменных покрытий. Подход заключается в анализе проблем ионно-плазменных технологий, препятствующих повышению системных показателей качества как отдельного вида покрытий, так и их совокупности. Он позволяет определить основные проблемы, решение которых обеспечит повышение качества обработки.

**Ключевые слова:** системный подход, качество покрытий, ионно-плазменные технологии, вакуумно-дуговой разряд.

### Введение

Из множества методов нанесения покрытий различного назначения особое положение по масштабам своего внедрения в промышленность занимают ионно-плазменные технологии модифицирования поверхности с использованием вакуумно-дугового разряда. Обусловлено это, в частности, высокой адгезией покрытий к основе, которая не может быть обеспечена ни одним из существующих способов нанесения покрытий [1]. За счет поверхностной обработки методами ионно-плазменных технологий обеспечивается: повышение стойкости режущего инструмента в 2,5 – 3,5 раза, увеличение общего срока службы компрессорных лопаток ГТД в 1,8 – 2 раза, повышение коррозионной стойкости до пяти раз [2].

Основной задачей при получении покрытий является обеспечение их качества. Под качеством понимают соответствие параметров покрытия (адгезия, воспроизводимость состава и др.) заданному комплексу свойств, обеспечивающих выполнение возложенных на покрытие функциональных заданий (износостойкость, коррозионностойкость и пр.). Следует отметить постоянный рост требований к эксплуатационным характеристикам изделий с покрытиями со стороны потребителей. Задача решается специалистами в области ионно-плазменной обработки обычно созданием новых видов покрытий с более высокими параметрами. Работы в указанном направлении сдерживаются недостаточной изученностью физики процессов, а отсюда нерешенностью ряда проблем и, как следствие, отсутствием соответствующего оборудования. По этим же причинам практически не происходит совершенствование процессов уже существующих технологий ионно-плазменной обработки. Характерным является также отсутствие системного подхода к обеспечению качества покрытий.

Представляется актуальной разработка комплексного системного подхода к обеспечению качества изделий с покрытиями, в результате которого возможно определение основных проблем получения различных видов покрытий ионно-плазменными методами. Решение этих проблем обеспечит повышение функциональных свойств обработанных изделий.

## 1. Анализ состояния вопроса

Повышение качества выпускаемой продукции является одним из основных факторов обеспечения ее конкурентоспособности. Национальным стандартом Украины [3] устанавливается восемь принципов управления качеством, среди которых – системный подход, ориентация на потребителя и постоянное улучшение качества. Такое улучшение качества для изделий с покрытиями обеспечивается в основном на этапе реализации ионно-плазменных технологий.

Оценка эффективности процессов нанесения тонких пленок на изделия в вакууме с позиции менеджмента качества выполнена в работе [4]. В ней отмечается, что на сегодняшний день проблема достижения заданных показателей качества в ходе производственного процесса, а также их оценка, процессы достижения заданного качества по этапам разработки и производства высокотехнологичной наукоемкой продукции, к которой относятся покрытия, являются актуальными. В результате улучшения системы качества, выполненного в работе (рекомендации по процессам проектирования оборудования и реализации технологических процессов при нанесении тонкопленочных покрытий из металлов и их соединений на поверхности большого размера) были повышены: процент выхода годных изделий, производительность и надежность оборудования.

Анализу проблем ионно-плазменных технологий посвящена работа [5]. Здесь на основе [6], где выделены основные зоны, характерные для процессов осаждения покрытий вакуумно-дуговыми методами, кратко рассмотрены присущие им проблемы, а также намечены пути решения некоторых из них. Разделение на зоны, предложенное в [6], достаточно условно и представляется неполным.

На предприятии ЗАО «Новые инструментальные решения» (г. Рыбинск) для повышения конкурентоспособности продукции и обеспечения гарантии ее качества внедрена система менеджмента качества [7]. За два года, прошедшие с момента запуска (2010–2012 гг.), это предприятие выпустило 40000 единиц металлорежущего инструмента с нанопокрытием, а также обеспечило переточку более 97000 единиц инструмента [8].

Создание специализированного предприятия по нанесению покрытий – одно из редких исключений на просторах стран СНГ. Обычно при достаточно крупном предприятии создается участок по напылению, позволяющий достаточно эффективно решать задачи нанесения специализированных покрытий на продукцию этого и смежных предприятий, например, как это сделано при получении покрытий на изделия остекления самолетов компаний «Микоян» и «Сухой» [9]. В этой и во многих других работах, посвященных получению покрытий различного назначения, в основном уделяется внимание решению одной, в лучшем случае нескольких задач, повышающих качество обработки. Комплексный подход к проблеме получения качественных покрытий не применяют.

**Целью работы** является разработка комплексного системного подхода к обеспечению качества покрытий, получаемых ионно-плазменными методами на основе вакуумно-дугового разряда.

## 2. Результаты исследований и обсуждения

Предложенное в работе [6] разделение на характерные зоны, присущие процессам формирования покрытий вакуумно-дуговыми методами, в силу специфики процессов достаточно условно. Однако применение такого подхода позво-

ляет классифицировать проблемы ионно-плазменной обработки по месту их локализации. К зонам, выделенным в [6], для большего соответствия реальной картине процессов следует добавить еще одну – зону подавления микрокапельной фазы вакуумно-дугового разряда, как это показано на рис. 1. В этой зоне различными методами, рассмотренными в [10], осуществляется сепарирование плазменного потока от капельной фазы. Обычно сепарирующее устройство относят к области формирования плазмы (к вакуумно-дуговому источнику плазмы [10]), однако представляется логичным выделить эту зону отдельно.

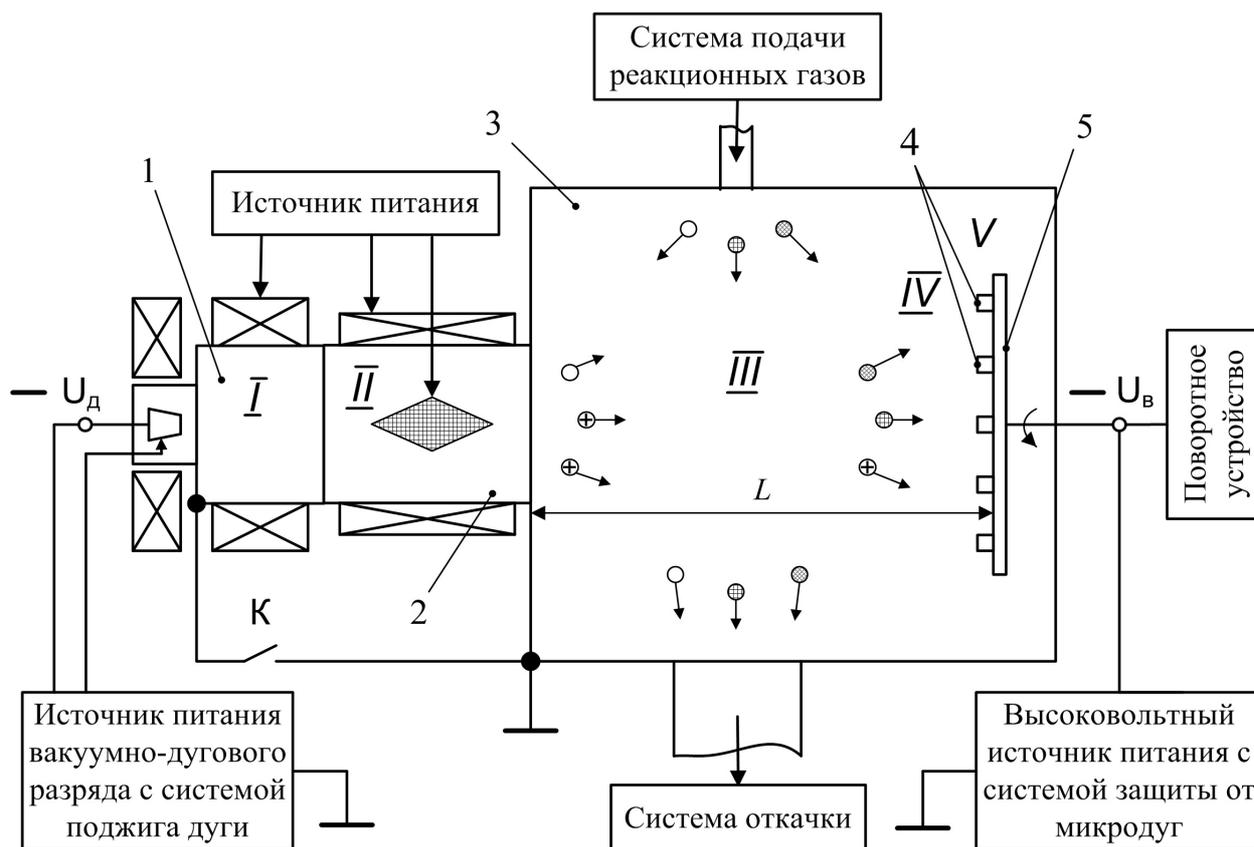


Рис. 1. Характерные зоны при формировании покрытий ионно-плазменными методами: 1 – источник плазмы; 2 – сепарирующее устройство; 3 – вакуумная камера; 4 – обрабатываемые изделия; 5 – подложкодержатель; I – область формирования потока металлической плазмы; II – зона подавления микрокапельной фазы; III – область взаимодействия потоков металлической плазмы с газовой мишенью; IV – переходная зона; V – зона формирования покрытия

С учетом предложенного разделения на зоны классификацию проблем ионно-плазменных технологий можно представить в виде, отображенном в таблице. Здесь дополнительно введена графа «Общие», которая касается одновременно всех зон, в частности, автоматизация процессов управления и контроля.

Устранение всех отмеченных в таблице проблем – крайне сложная и наукоемкая задача, требующая большого количества материальных и ресурсных затрат. Решив ее (полное решение в настоящий момент отсутствует), можно значительно поднять качество покрытий и эффективность использования изделий с покрытиями. Однако такой подход экономически нецелесообразен в связи со следующим.

## Классификация основных проблем ионно-плазменных технологий по зонам их локализации

Характерные зоны при реализации ионно-плазменных технологий					
I	II	III	IV	V	Общая
1.1. Обеспечение надежного зажигания дугового разряда в широком интервале токов, давлений и материалов катода в стационарном и в импульсном режимах работы источников плазмы	Максимальное устранение макрочастиц из плазменного потока	2.1. Создание необходимых парциальных давлений $N$ реакционных газов в рабочем объеме	3.1. Транспортировка в необходимых концентрациях и с достаточной энергией частиц, входящих в состав покрытия к обрабатываемой поверхности	4.1. Проведение процесса ионной очистки без образования микродуговых привязок	5.1. Повышение качества обработки путем комплексной автоматизации всего технологического процесса
1.2. Управление составом плазменного потока, генерируемом вакуумно-дуговым источником плазмы		2.2. Перераспределение ионного компонента плазмы оптимальным образом для получения необходимых характеристик покрытий	3.2. Дополнительная расфокусировка плазменного потока в целях выравнивания плотности ионного тока для получения равномерных толщинных покрытий	4.2. Создание необходимой для формирования покрытия температуры поверхности без перегрева локальных участков и ее контроль	5.2. Повышение экономической эффективности за счет снижения материальных и энергетических затрат
1.3. Повышение эксплуатационных характеристик: коэффициента использования материала катода и его запаса; оперативности замены отработанного катода					

Качество продукции в общем случае представляет собой комплексное свойство, определяемое набором значений системных параметров показателей качества, различных для каждого типа покрытия. Взаимосвязь системных параметров показателей качества покрытий, видов покрытий и процессах в характерных зонах показана на рис. 2. Достижение максимального значения всех системных параметров качества для каждого вида покрытия путем решения всех проблем по каждой зоне (см. таблицу) нерентабельно. Действительно, например, для защитных (коррозионностойких) покрытий системный параметр «пористость» должен иметь минимальное значение, в то же время для износостойких покрытий его значение практически не лимитировано.

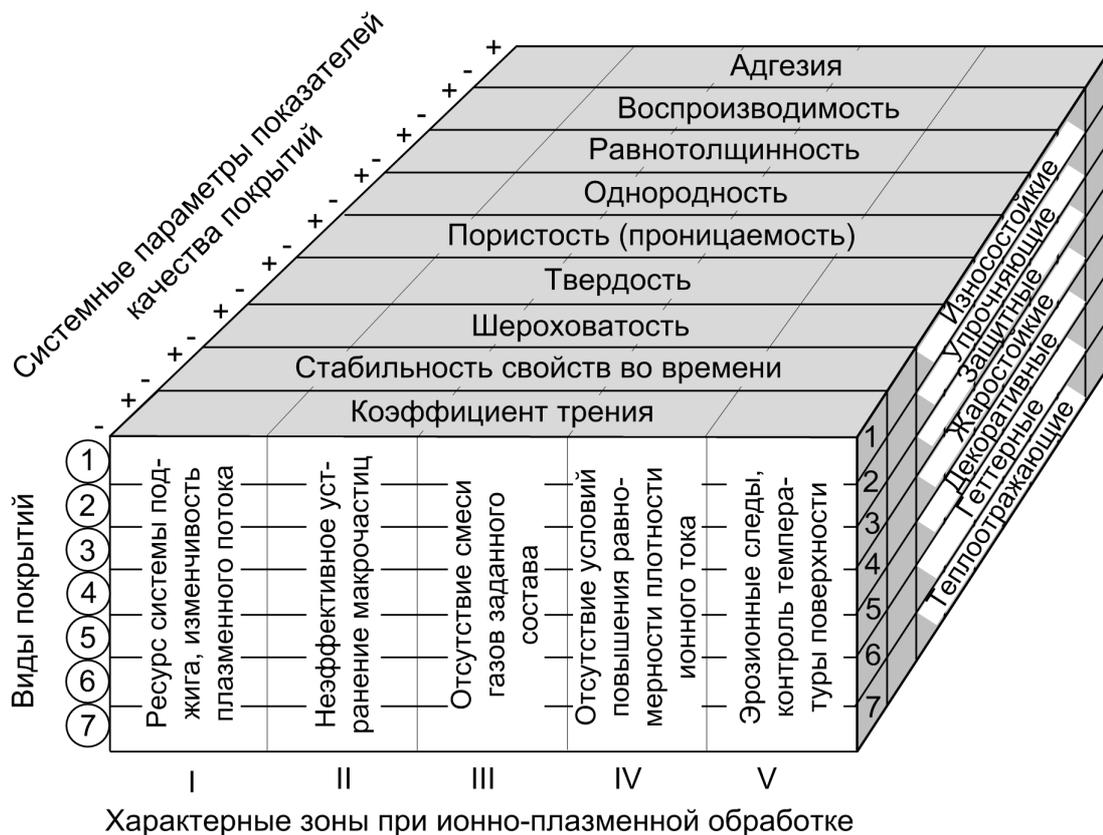


Рис. 2. Взаимосвязь параметров качества покрытий, их видов и основных проблем при ионно-плазменной обработке

Таким образом, для каждого вида покрытий существует определенный набор значений параметров показателей качества, обеспечиваемый уровнем решения проблем в каждой характерной зоне на данный момент.

Анализ системных параметров показателей качества покрытий показывает, что их можно разделить на две основные группы. К первой относятся параметры, имеющие значение для всех типов покрытий. Ими являются, в частности, адгезия, воспроизводимость состава, стабильность свойств во времени. Ко второй группе параметров относятся те, которые непосредственно обеспечивают основное функциональное свойство покрытия, например, коэффициент трения для антифрикционного покрытия.

Системно-аналитический подход, при котором выявляются и в первую оче-

редь решаются проблемы в характерных зонах, имеющие определяющее влияние на большее количество системных параметров показателей качества как в первой, так и во второй группах, будет экономически наиболее целесообразен.

Исходя из предложенного подхода, на примере группы покрытий, показанных на рис. 2, определены основные проблемы в каждой характерной зоне. Их полное или частичное решение позволит повысить уровень качества покрытий и обеспечивать его в процессе производства.

### Заключение

1. Уточнено на основе анализа процессов нанесения покрытий вакуумно-дуговыми ионно-плазменными методами разделение на основные характерные зоны, возникающие при обработке изделий. Уточнение заключается в выделении зоны подавления капельной фазы вакуумно-дугового разряда.

2. Рассмотрены и классифицированы по зонам проблемы ионно-плазменных технологий. Отдельно выделены проблемы, имеющие отношения ко всем зонам, в частности, автоматизация управления и контроля процессами осаждения.

3. Предложен системно-аналитический подход к обеспечению качества вакуумно-дуговых ионно-плазменных покрытий. Подход заключается в выявлении и первоочередном решении проблем в характерных зонах, имеющих определяющее влияние на большее количество системных параметров показателей качества покрытий, что делает его экономически целесообразным.

### Список литературы

1. Габович, М. Д. Пучки ионов и атомов для управляемого термоядерного синтеза и технологических целей / М. Д. Габович, Н. В. Плешивцев, Н. Н. Семашко. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 249 с.

2. Сисоев, А. Ю. Розробка та дослідження генератора сумішей газів для отримання складнокомпозиційних іонно-плазмових покриттів : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 21.10.11 / Сисоев Андрій Юрійович ; Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут». – Х., 2011, 20 с.

3. ДСТУ ISO 9000:2007. Системи управління якістю. Основні положення та словник термінів. – На заміну ДСТУ ISO 9000–2007 ; чинний з 01.01.2008. – К. : Держспоживстандарт України, 2008. – 36 с.

4. Колесник, М. А. Оценка эффективности процессов нанесения тонких пленок на изделия в вакууме с позиции менеджмента качества [Электронный ресурс] / М. А. Колесник, Л. Л. Колесник // Наука и образование, 2011. – №7. – 14 с. Режим доступа <http://technomag.edu.ru/doc/197676.html>. – 17.03.2014. Загл. с экрана.

5. Сысоев, Ю. А. Исследования по инженерии формирования поверхности с применением смесей газов. Ч.1. Характерные зоны [Текст] / Ю. А. Сысоев, Г. И. Костюк, А. Ю. Сысоев // Вісник інженерної академії наук України, 2011. – С. 184 – 190.

6. Сысоев Ю. А. Проблемы ионно-плазменных технологий на основе вакуумно-дугового разряда и пути их решения [Текст] / Ю. А. Сысоев // Авиационно-космическая техника и технология. – 2011. – № 7 (84). – С. 38–43.

7. Система качества [Электронный ресурс] / ЗАО «Новые инструментальные решения», сайт. – Режим доступа <http://www.zao-nir.com/sistema-kachestva/>. – 10.03.2014. Загл. с экрана.

8. Металлорежущий инструмент с наноструктурированным покрытием [Электронный ресурс] / РОСНАНО, сайт. – Режим доступа <http://www.rusnanonet.ru/products/19442/>. – 10.03.2014. Загл. с экрана.

9. Разработка технологии нанесения методом магнетронного напыления металлооптических и кремнийорганических покрытий на сложнопрофильные изделия авиационного остекления из органического стекла [Электронный ресурс] / Союз авиапроизводителей, сайт. – Режим доступа [http://www.aviationunion.ru/Files/Nom\\_4\\_Obninsk.pdf](http://www.aviationunion.ru/Files/Nom_4_Obninsk.pdf). – 10.03.2014. Загл. с экрана.

10. Аксенов, И. И. Вакуумно-дуговые источники фильтрованной плазмы [Текст] / И. И Аксенов // Вакуумные технологии и оборудование. – Х. : ННЦ ХФТИ, Константа, 2003. – С. 238–258.

**Рецензент:** д.т.н. доц. В.Ф. Сорокин Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков

Поступила в редакцию 12.02.2014

## **Забезпечення якості вакуумно-дугових іонно-плазмових покриттів**

Уточнено на основі аналізу процесів нанесення покриттів вакуумно-дуговими іонно-плазмовими методами поділ на основні характерні зони, що виникають при обробці виробів. Розглянуто та класифіковано по зонах проблеми іонно-плазмових технологій. Запропоновано системний підхід до забезпечення якості вакуумно-дугових іонно-плазмових покриттів. Підхід полягає в аналізі проблем іонно-плазмових технологій, що перешкоджають підвищенню системних показників якості як окремо виду покриттів, так і їх сукупності. Він дозволяє визначити основні проблеми, рішення яких забезпечить поліпшення якості обробки

**Ключові слова:** системний підхід, якість покриттів, іонно-плазмові технології, вакуумно-дуговий розряд.

## **Ensuring quality of ion-plasma coatings**

Clarified by analyzing the processes coatings of vacuum-arc method of separation on the main characteristic zones which are formed at the processing of products. Examined and classified at zones problems of ion-plasma technologies. Systematic approach was proposed to use to ensure the quality of ion-plasma coatings. Approach is to analyze the problems of ion-plasma technologies based on vacuum arc discharge that impede increase of systemic quality indicators as a separate type of coating, and their combinations. It allows to identify the main problems whose solution will improve the quality of processing.

**Keywords:** systematic approach, the quality of coatings, ion-plasma technology, the vacuum arc discharge.