

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ВАКУУМНОГО ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО ПОКРЫТИЯ, ПОЛУЧЕННОГО ЭЛЕКТРОДУГОВЫМ МЕТОДОМ

В. И. Богданович, Д. Р. Попов

Аннотация: Рассмотрены основные факторы, оказывающие влияние на качество вакуумных ионно-плазменных покрытий. Дано краткое описание процесса ионно-плазменного напыления. Выделены основные преимущества и недостатки. Отмечены пути совершенствования технологии вакуумного ионно-плазменного напыления. Учтено влияние составляющих плазменного потока на структуру и свойства покрытия. Отмечено, что наличие микрокапельной фазы в потоке ухудшает трибологические свойства покрытий из нитридов и карбидов. Предложен новый генератор-сепаратор плазменного потока, существенно снижающий содержание микрокапельной фазы при выращивании покрытий вакуумным ионно-плазменным электродуговым методом.

Ключевые слова: ионно-плазменное напыление; вакуум; электродуговой метод; технологические факторы; микрокапельная фаза; генератор-сепаратор плазменного потока; качество покрытия.

Вопросы повышения надежности и ресурса изделий авиационной и космической техники продолжают оставаться актуальными направлениями. Решение этих вопросов возможно путем нанесения специальных покрытий разными методами. Достаточно широкое распространение получили способы осаждения покрытия в вакууме посредством ионно-плазменных технологий [1-13]. В этих технологиях струя плазмы, состоящая из атомов, ионов металла и электронов, генерируемая за счет электродугового испарения или ускорения в магнитном поле, осаждается на изделие в вакуумной камере. Отличительными особенностями таких потоков являются: высокая ионизация плазмы; средняя кратность ионизации ионов более единицы; высокая плотность потока материала, доставляемого потоком плазмы; высокая начальная энергия ионов в потоке, составляющая десятки эВ [1-2].

К достоинствам ионно-плазменного напыления относят:

- 1) контроль свойств осаждаемого покрытия в процессе напыления;
- 2) равномерность покрытия и высокая

адгезионная прочность;

- 3) возможность нанесения покрытий из тугоплавких и неплавящихся материалов;

- 2) постоянство стехиометрического состава поверхности изделия;

- 5) управление составом катодной мишени на протяжении всего процесса напыления;

- 6) возможность очистки напыляемой поверхности изделия и наращиваемого покрытия распылением.

При всех достоинствах ионно-плазменное напыление имеет также ряд недостатков:

- 1) ограничение, заключающееся в возможности нанесения покрытий только из металлов и сплавов, так как катод должен быть электропроводным;

- 2) невысокая производительность процесса;

- 3) повышенная сложность технологии и оборудования;

- 4) ограниченность размеров изделия габаритами вакуумной камеры;

- 5) низкие показатели энергетических коэффициентов распыления, испарения и конденсации;

- 6) невозможность нанесения покрытий на внутренние и другие поверхности деталей,

которые не имеют прямого доступа для плазменного потока.

Дальнейшее совершенствование технологии ионно-плазменного напыления невозможно без решения ряда вопросов, оказывающих существенное влияние на качество получаемого покрытия [6]:

1) необходимо учесть взаимодействие плазмы с реакционными газами при переносе испаряемого материала;

2) необходимо учесть взаимодействие между поверхностью и частицами из атомарного потока и их влияние на протекание реакций при выращивании покрытий;

3) необходимо учесть электрообменные процессы между плазмой в потоке с поверхностью изделия в процессе осаждения покрытия;

4) обеспечить оптимизацию структуры многослойных и многокомпонентных систем для значительного повышения физико-химических свойств покрытия;

5) учесть влияние и установить закономерности технологической наследственности, обусловленной технологическим методом на структуру и свойства деталей с покрытиями;

6) установить влияние и закономерности основных технологических параметров процесса напыления на свойства осаждаемых покрытий;

7) определить оптимальные области реализации для многокомпонентных и многослойных покрытий.

Исследование и учет вышеприведенных факторов с последующей разработкой новых технологических режимов позволит повысить качество и ключевые свойства покрытий. В рамках данной работы была решена прикладная задача, учтено влияние составляющих плазменного потока на структуру и свойства покрытия, проведена модернизация оборудования и технологической оснастки для снижения микрокапельной фазы при выращивании покрытия.

Повышение качества вакуумного ионно-плазменного покрытия, полученного электродуговым методом, за счёт снижения микрокапельной фазы

Вакуумная ионно-плазменная электродуговая технология позволяет получать покрытия близкие по составу к электропроводящему материалу катода и за счёт

использования реакционных газов получать нитриды или карбиды металлов в материале катода. Материал катода с помощью вакуумной дуги катодной переводится в плазменное состояние и в виде плазменных квазинейтральных потоков направляется на поверхность изделия, за счёт протекания плазмохимических гетерогенных реакций образует покрытие.

В вакуумном ионно-плазменном электродуговом методе металлическую плазму получают при помощи электродуговых испарителей. После чего поток ускоряется в электрическом и магнитном полях за счет использования специальных электродуговых ускорителей и направляется к поверхности изделия. Генерируется плазменный поток не является однородным с точки зрения присутствующих в нем фаз и состоит в основном из ионной фазы (от 30 до 95 %), а также паровой фазы (от 5 до 65 %) и микрокапельной фазы (от 0,5 до 20 %). Кинетическая ионов в плазменном потоке достигает сотни эВ. Такие параметры плазменных потоков создают предпосылки для получения мелкоструктурных покрытий высокой сплошности и высокой адгезионной прочности на изделиях из металлов, сплавов, полимеров и композиционных материалов. Недостатком получаемых покрытий является наличие в их составе фрагментов микрокапельной фазы, которая ухудшает в основном трибологические свойства покрытий из нитридов и карбидов, хотя в ряде случаев такое ухудшение нивелируется рядом других положительных свойств покрытий, что например приводит к тому, что эта технология является одной из основных при получении износостойких покрытий для повышения стойкости обрабатываемого инструмента.

В последние годы вакуумная ионно-плазменная электродуговая технология получила дальнейшее развитие в НИИ технологий и проблем качества Самарского университета на установке генератора-сепаратора плазменного потока ННВ 6.6-И1, который не только генерирует плазменный поток, но очищает его от микрокапельной фазы. Схема используемого генератора-сепаратора установки приведена на рисунке 1.

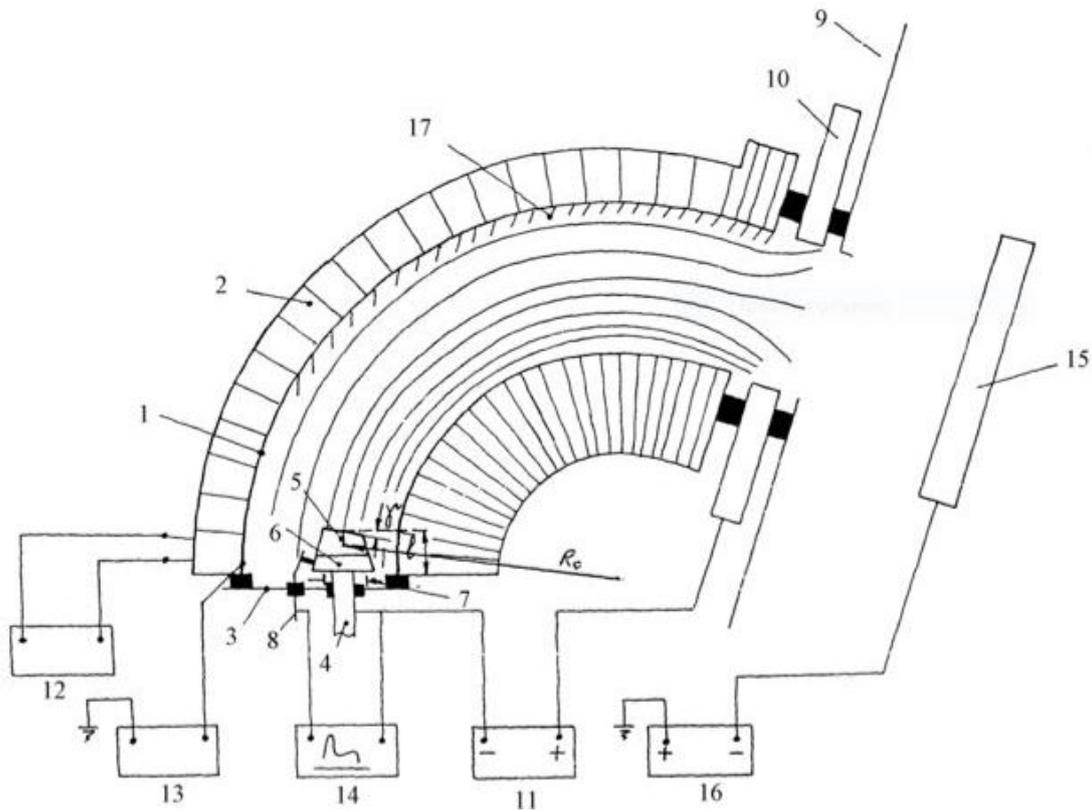


Рис. 1. Схема используемого генератора-сепаратора установки ННВ 6.6-И1:
 1 – плазмододержатель, 2 – электромагнитная катушка, 3 – фланец, 4 – катододержатель,
 5 – катод, 6 – юбка, 7 – защитный экран, 8 – поджигающий электрод с изолятором,
 9 – вакуумная камера, 10 – анод, 11 – источник питания дугового разряда,
 12 – источник питания электромагнитной катушки, 13 – двухполярный источник
 питания корпуса плазмодода, 14 – источник, формирующий высоковольтный импульс
 поджига дугового разряда, 15 – подложка, 16 – источник питания подложки,
 17 – решётка

Предложенный генератор-сепаратор работает следующим образом. Напряжение подается на электромагнитную катушку и параллельно оси плазмодода возникает равномерное и непрерывное магнитное поле. Между катодом и поджигающим электродом создается высоковольтный импульс, что приводит к пробое и возникновению электрической искры. За счет этой искры между поверхностями катода и анода инициируется дуговой разряд. Следует отметить, что в качестве анода может выступать как отдельный специальный электрод, так и стенка вакуумной камеры.

Возникающее магнитное поле ориентировано ортогонально рабочей поверхности катода и параллельно оси плазмодода. Силовые линии магнитного поля совместно с боковой поверхностью катода образуют стороны острого угла. Общеизвестно, что катодные пятна дуги смещаются в направлении

подобного острого угла от боковой на рабочую поверхность катода. С целью наиболее полного использования материала катода в конструкции применяется специальная юбка. Величина выработки материала катода в данном исполнении устройства может достигать величины порядка 1 мм. Для защиты катододержателя при возникновении аварийной работы источника плазмы предусмотрен защитный экран.

Плазменный поток испытывает воздействие магнитного поля и перемещается по направлению к выходу из плазмодода вдоль магнитных линий. С целью достижения большей однородности потока металлической плазмы по продольному сечению конечные участки плазмодода имеют цилиндрическую форму с электромагнитной катушкой. Для управления дрейфом отдельных ионов корпус плазмодода находится под напряжением. Однако, такое напряжение, подаваемое на корпус,

может приводить к искажениям электрического поля. Для нивелирования этого негативного эффекта входной фланец плазмоведа изолируют от стенок.

В плазменном потоке присутствуют заряженные и нейтральные компоненты. В отличие от заряженных компонент, движущихся под действием магнитного поля вдоль силовых линий, нейтральные компоненты движутся по прямолинейно. Это приводит к осаждению последних на стенках плазмоведа. Для снижения отражения макрочастиц от стенок с большим радиусом предусмотрена съёмная решетка. При выходе из генератора-сепаратора плазменный поток направляется к поверхности конденсации.

При осаждении на подложку покрытий с использованием материалов типа Al_2O_3 в качестве анода может использоваться горячий электрод вместо стенки вакуумной камеры.

Вакуумная камера заполняется инертным газом. Корпус плазмоведа находится под нулевым потенциалом, либо на него подается отрицательный потенциал. На выходе из генератора-сепаратора возникает плазменный поток инертного газа. На поверхность напыляемого изделия подается напряжение. Ионы из плазменного потока ударяются о поверхность конденсации, что приводит к её распылению, а следовательно, к очистке и активации. Ионную очистку распылением проводят при малых значениях ускоряющего напряжения и постепенно доводят до заданной величины с целью избежать возникновения микродуг на поверхности конденсации.

После распыления вместо инертного газа в вакуумную камеру закачивается реакционный. На выходе из генератора-сепаратора возникает плазменный поток с реакционным газом. Ионы реакционного газа взаимодействуют с поверхностью конденсации и проникают в её поверхностный слой. Подобные диффузионные процессы активируются ионной бомбардировкой. После насыщения поверхностного слоя подложки и получения диффузионного подслоя технологический режим напыления устанавливается таким образом, чтобы содержание ионов реакционного газа не превышало растворимости этого газа в материале напыляемой поверхности.

После получения диффузионного подслоя проводят короткую по продолжительности ионную очистку для ликвидации соеди-

нений материала поверхности конденсации с реакционным газом. После завершения процесса очистки на корпус плазмоведа подается положительный потенциал, в результате чего в плазмовод поступают ионы металла. На поверхность конденсации подаются меньшие значения напряжения. На выходе из генератора-сепаратора возникает поток металлической плазмы, который осаждающаяся на напыляемой поверхности образует покрытие.

Заключение

Отмечена высокая актуальность применения ионно-плазменных методов получения специальных покрытий в вопросах повышения надежности и ресурса изделий авиационной и космической техники. Описаны достоинства и недостатки вакуумной ионно-плазменной технологии получения покрытий. Приведен детальный перечень вопросов, как фундаментальных, так и прикладных, необходимых для решения с целью совершенствования технологии ионно-плазменного напыления. Учтено влияние составляющих плазменного потока на структуру и свойства покрытия. Отмечено, что наличие микрокапельной фазы в потоке ухудшает трибологические свойства покрытий из нитридов и карбидов. Предложен новый генератор-сепаратор плазменного потока, существенно снижающий содержание микрокапельной фазы при выращивании покрытий вакуумным ионно-плазменным электродуговым методом. Описаны процессы распыления, очистки поверхности и осаждения покрытия с использованием предложенного генератора-сепаратора плазменного потока.

Литература

1. Барвинок В.А. Плазма в технологии, надежность, ресурс. М.: Наука и технологии, 2005. 456 с.
2. Барвинок В. А., Богданович В. И. Физические основы и математические методы моделирования процессов нанесения вакуумных ионно-плазменных покрытий. М.: Машиностроение, 1999. 305 с.
3. Богданович В. И. Разработка методологических принципов проектирования технологий формирования поверхностного слоя изделий плазменным напылением // Проблемы машиностроения и автоматизации. 1999. № 2. С. 87–94.

4. Богданович В. И. Кинетика гетерогенного плазмохимического синтеза нитридных покрытий из плазменных потоков // Проблемы машиностроения и автоматизации. 1999. № 1. С. 65–71.
5. Bogdanovich V. I., Giorbelidze M. G. Mathematical modelling of thin-film polymer heating during obtaining of nanostructured ion-plasma coatings // Procedia Engineering. 2017. Vol. 201. P. 630–638. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.09.677.
6. Bogdanovich V. I., Giorbelidze M. G. Main problems of mathematical modeling high energies plasma technologies // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Ю – 2020. Vol. 795, Issue 1 –Article number 012004. DOI: 10.1088/1757-899X/795/1/012004.
7. Peculiarities of radiation-induced defect formation in nanocrystals embedded in a solid matrix / B. L. Oksengendler, N. N. Turaeva, S. E. Maksimov [et al.] // Journal of Experimental and Theoretical Physics. 2010. Vol. 111, Issue 3. P. 415–420.
8. Робертс М., Макки Ч. Химия поверхности раздела металл-газ. М.: Мир, 1981. 359 с.
9. Gumen O., Bilyk I., Kruzhkova M. Geometrical Simulation of Optimized Vacuum-Condensation Spraying Technology for Titanium Nitride on Structural Steel // Lecture Notes in Civil Engineering. 2020. Vol. 47. P. 103–110.
10. Structure, mechanical characteristics and thermal stability of high speed physical vapor deposition (Al, Cr)₂O₃ coatings / K. Bobzin, T. Brögelmann, C. Kalscheuer [et al.] // Thin Solid Films. 2019. Vol. 690. article number 137529.
11. Development and characterization of magnetron sputtered self-lubricating Au-Ni/a-C nano-composite coating on CuCrZr alloy substrate / Z. Chen, L. Qiao, J. Hillairet [et al.] // Applied Surface Science. 2010. Vol. 492. P. 540–549.
12. Chang Y.-Y., Cai M.-C. Mechanical property and tribological performance of AlTiSiN and AlTiBN hard coatings using ternary alloy targets // Surface and Coatings Technology. 2019. Vol. 374. P. 1120–1127.
13. Potoczna-Petru D., Kępiński L., Krajczyk L. Interaction of Co thin films with SiO₂: Effect of Co loading // Materials Chemistry and Physics. 2005. Vol. 92 (2–3). P. 613–615.

IMPROVING THE QUALITY OF VACUUM ION-PLASMA COATING OBTAINED BY THE ELECTRIC ARC METHOD

V. I. Bogdanovich, D. R. Popov

Annotation: The main factors influencing the quality of vacuum ion-plasma coatings are considered. A brief description of the ion-plasma spraying process is given. The main advantages and disadvantages are highlighted. The ways of improving the technology of vacuum ion-plasma spraying are noted. The influence of the components of the plasma flow on the structure and properties of the coating is taken into account. It is noted that the presence of a micro-droplet phase in the flow worsens the tribological properties of coatings of nitrides and carbides. A new generator-separator of the plasma flow has been proposed, which significantly reduces the content of the micro-droplet phase when growing coatings using the vacuum ion-plasma electric arc method.

Key words: ion-plasma spraying, vacuum, electric arc method, technological factors, microdroplet phase, generator-separator of plasma flow, coating quality.

Статья поступила в редакцию 08.07.2020 г.

© Aparin M. P., Yudinsev V. V., 2020.

Bogdanovich Valery Iosiphovich (bogdanovich@ssau.ru), professor

of the Department of aircraft production and quality management in mechanical engineering;

Popov Denis Ruslanovich (ruslanppv@rambler.ru), student II course of the Institute of Aviation Technology of the Samara University,

443086, Russia, Samara, Moskovskoye Shosse, 34.