ГАЗОНЕПРОНИЦАЕМЫЕ PVD-ПОКРЫТИЯ GAS-TIGHT PVD COATINGS

Г.Боровский*, к.т.н., С.Григорьев*, к.т.н., С.Молодык*, к.т.н. / s.grigoriev@vniinstrument.ru
G.Borovsky*, Ph.D., S.Grigoryev*, Ph.D., S.Molodyk*, Ph.D.

Потребность в защитных и упрочняющих поверхностных покрытиях для деталей и инструмента постоянно растет. Наиболее востребованы коррозионностойкие, жаростойкие, а также износостойкие и антифрикционные покрытия. Одной из важных областей применения специальных покрытий является производство деталей газотурбинных двигателей. На основе анализа методов получения покрытий для изделий, работающих в агрессивных средах, создана новая технология нанесения наноструктурных газонепроницаемых PVD-покрытий.

The demand for protective and strengthening surface coatings for parts and tools is constantly growing. Corrosion-resistant, heat-resistant, and also wear-resistant and antifrictional coatings are most demanded. Important area of application of special coatings is the production of parts for gas turbine engines. Analysis of coating methods for components that operate in harsh environments allowed to develop a new technology of nanostructured gas-tight PVD coating.

Покрытия, обладающие наиболее высокими технологическими свойствами, наносятся по технологиям PVD (физическое осаждение из газовой фазы) и CVD (химическое осаждение из газовой фазы). Исследование структуры таких покрытий на электронном микроскопе показывает, что они имеют столбчатую структуру с размером дисперсных столбчатых кристаллитов от 1 до 3 мкм, а также характеризуются наличием капельной фазы непрореагировавшего осаждаемого металла размерами до 5 мкм. В связи с этим, в агрессивных средах такие покрытия подвержены фрагментарному разрушению и отшелушиванию. Чтобы избежать таких процессов, работающие в агрессивных средах и при высоких температурах покрытия деталей и инструмента должны быть газонепроницаемыми. Это позволит исключить локальное нарушение их сплошности и, таким образом, повысит надежность изделий.

ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ГАЗОНЕПРОНИЦАЕМЫХ ПОКРЫТИЙ

Наноструктурные газонепроницаемые покрытия востребованы, в первую очередь, в производстве деталей газотурбинных двигателей. Тенденцией развития современных газовых турбин является повышение температуры рабочего газа и, соответственно, больший нагрев рабочих колес турбин, лопаток и других деталей соплового аппарата.

При высоких тепловых и механических нагрузках в агрессивных средах указанные детали быстро выходят из строя, что приводит к разрушению дорогостоящих агрегатов и серьезным авариям.

Эффективным направлением улучшения эксплуатационных свойств жаропрочных сплавов для повышения надежности деталей газотурбинных двигателей является нанесение специальных покрытий.

Рис.1. Принципиальная схема источника потока сепарированной плазмы

Fig.1. Schematic diagram of the source of the separated plasma flow

Сравнение характеристик технологий нанесения газонепроницаемых покрытий
Comparison of the gas-tight coating technologies

Метод нанесения покрытия Coating technology	Характеристики покрытий Characteristics of coatings			Толщина покрытия, мкм Coating thickness, μm	Скорость осаждения, мкм/ч Deposition velocity, $\mu\text{m/h}$	Время осаждения (500 мкм) Deposition time (500 μm)	Относительная себестоимость эксплуатации оборудования Relative operating cost
	Структура Structure	Теплостойкость Heat resistance	Газонепроницаемость Gas-tightness				
Газофазный CVD Gas-phase CVD	Ультра-мелко-дисперсная Ultra fine-dispersed	+	–	100–500	7–12	50 ч	1,0
Электродуговой PVD с сепарацией плазменного потока Arc-PVD with separation of plasma flow	Наноструктурная Nano-structured	+	+	100–500	10–20	54 ч	0,3
Магнетронный PVD Magnetron PVD	Ультра-мелко-дисперсная Ultra fine-dispersed	+	+	100–500	2–5	210 ч	0,3

ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОСТРУКТУРНЫХ ГАЗОНЕПРОНИЦАЕМЫХ ПОКРЫТИЙ

Для нанесения покрытий, как правило, используется либо магнетронное распыление, либо осаждение из газовой фазы. Недостатками первого являются низкая производительность и высокая себестоимость, недостатками второго – нестабильность

свойств наносимого покрытия из-за наличия в нем неоднородностей (дендритов), что не может обеспечить газонепроницаемость, применение высокотоксичных веществ, а также высокая себестоимость.

Для устранения перечисленных недостатков были проведены исследования и разработан технологический процесс формирования толстослойных газонепроницаемых композиционных нанострук-

Coatings with the highest properties are obtained by PVD (physical vapor deposition) and CVD (chemical vapor deposition). The study of the structure of such coatings in an electron microscope shows that they have a columnar structure with the size of dispersed columnar crystallites of 1 to 3 μm and are characterized by the presence of condensed phase of unreacted deposited metal, which can be up to 5 μm . In this regard, in aggressive environments such coatings can partially be destroyed and peel off. To avoid such processes, coating of parts and tools that operate in harsh environments and at high

temperatures, must be gas-tight. This will avoid local damage of coating continuity and, thus, increase the reliability of the products.

MARKET FOR GAS-TIGHT COATINGS

Nanostructured gas-tight coating are in demand, primarily in the manufacture of parts for gas turbine engines. The trend in development of up-to-date gas turbines is the increasing of the temperature of the working gas and, consequently, bigger heating of turbine impellers, blades and other parts of the nozzle block. Under high thermal and mechanical loads in corrosive environments these items are

easily damaged, which leads to the destruction of expensive aggregates and serious accidents.

An effective way of improving the performance properties of high-temperature alloys to improve the reliability of parts of gas turbine engines is the application of special coatings.

OBTAINING OF NANOSTRUCTURED GAS-TIGHT COATINGS

The most demanded technologies of coating are magnetron sputtering and vapor deposition. The disadvantages of the first are low productivity and high cost, the disadvantages of the second are instability

Рис.2. Установка для нанесения PVD-покрытий электродуговым методом

Fig.2. Device for PVD coating by electric arc method

турных покрытий с использованием системы сепарирования плазменного потока. Технология заключается в создании электродуговым методом потока плазмы на основе композиции из четырех нитридов металлов CoN-NiN-CrN-AlN. Магнитная стабилизация потока в источнике плазмы исключает неоднородности наносимого покрытия, обеспечивая высокую адгезию с подложкой, на которую наносится покрытие. Благодаря использованию никелевых сплавов покрытие имеет высокую термостойкость. Сочетание плотноупакованного наноструктуриро-

ванного состава и толщины (до 500 мкм) покрытия обеспечивают высокую эффективность работы деталей в условиях агрессивных сред и высоких температур.

Технологический процесс состоит из предварительной обработки поверхности изделий ионными потоками, нагрева и нанесения покрытия. Длительность процесса – от 30 до 70 ч. Как установка, так и технология удовлетворяют всем требованиям современного производства, в том числе экологическим.

Идеи, заложенные в технологию, защищены патентами РФ и ЕС (Международная заявка РСТ/R497/00106).

УСТАНОВКА ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ PVD-ПОКРЫТИЙ ЭЛЕКТРОДУГОВЫМ МЕТОДОМ

Технологический процесс реализуется на специально сконструированной установке, камера которой имеет цилиндрическую форму с верхней крышкой для загрузки. Загрузка производится с использованием подъемных механизмов. В камере находится механизм, который обеспечивает вращение изделия в двух плоскостях – вертикальной и горизонтальной. Максимальный размер обрабатываемых изделий составляет 800 мм.

Вакуумная система установки изготовлена на базе форвакуумного и диффузионного насосов со скоростью откачки 7000 л/с. Установка укомплектована шестью высокопроизводительными электродуговыми источниками плазмы с магнитной системой стабилизации дугового разряда и фокусировки

of properties of the coating due to the inhomogeneities (dendrites) that cannot provide a gas impermeability, the use of highly toxic substances, and high cost.

To eliminate these drawbacks the studies were conducted and the process of obtaining of thick-film gas-tight composite nanostructured coatings using a separation of plasma flow was developed. The technology consists in obtaining of the plasma flow based on the composition of the four nitrides of metals CoN-NiN-CrN-AlN using the electric arc method. Magnetic stabilization of the flow in the plasma source eliminates the heterogeneity of the

coating, providing a high adhesion with the substrate, on which the coating is applied. Due to the use of nickel alloys, the coating has high thermal stability. The combination of dense nanostructured composition and thickness (up to 500 μm) of coating provides high performance of parts in corrosive environments and at high temperatures.

The technological process consists of preliminary treatment of the surfaces using ion flows, heating and coating. The processing time is from 30 to 70 hours. Both equipment and technology meet all the requirements of modern production, including environmental.

The ideas behind the technology are protected by patents of the Russian Federation and the EU (International patent application PCT/R497/00106).

EQUIPMENT FOR PVD COATING BY ELECTRIC ARC METHOD

For the implementation of the technology special equipment was created, the chamber of which has a cylindrical shape with a top cover to loading. Loading is performed with the use of lifting mechanisms. A special mechanism allows the rotation of the product in the chamber in two planes, vertical and horizontal.

плазменного потока для нанесения покрытия. Для предварительной обработки поверхности ионным потоком служит широкоапертурный источник газовой плазмы на основе термоэмиссионного разряда. Также установка оснащена системой подачи газа с автоматическим поддержанием давления в камере, системой измерения температуры изделий, необходимыми системами автоматизации.

ПЕРСПЕКТИВЫ НОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Новая технология позволяет заменить методы осаждения покрытий из газовой фазы. Структура покрытий, получаемых с применением разработанной технологии, значительно однороднее (отсутствуют "дендриты"), сплошность покрытия выше, граница покрытие-подложка слабо выражена благодаря высокой адгезии к монолитному материалу основы подложки. Стабильность процесса высокая, что обеспечивает высокий процент выхода работоспособных деталей.

В реализации проекта используются отечественные разработки и технологии. Новый процесс позволяет увеличить ресурс турбонасосных агрегатов энергетических установок. Оценивая перспективы, можно прогнозировать, что при решении задачи по увеличению ресурса работы деталей турбонасосных агрегатов энергетических установок с возможностью форсирования эксплуатационных режимов достигается общее повышение конкурентоспособности таких энергетических установок отечественного производства. Таким образом, дальнейшая коммерциализация данной разработки и создание технологи-

ческих линий для упрочнения позволят обеспечить производство отечественных мощных энергетических установок, повысят экспортный потенциал машиностроения в сегментах энергетических агрегатов и оборудования для упрочнения изделий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Боровский Г.В. Инструментальное производство в России. – М.: ВНИИинструмент, 2008. 160 с.
2. Боровский Г.В., Молодых С.У., Григорьев С.В. Износостойкое упрочнение штампов и прессформ // Материалы 15-й международной научно-практической конференции. – СПб., 2013. 5 с.
3. Додонов А.И., Башков В.М. Электродуговой испаритель с сепарацией плазменного потока. – Международная заявка РСТ/R497/00106.
4. Брень В.Г. и др. Износостойкие нитридосодержащие покрытия на основе сплавов молибдена, полученные методом КИБ // Защита металлов. 1981. Т. 17. № 3. С. 284-289.
5. Боровский Г.В. Развитие машиностроения России на основе технологического перевооружения. – М.: ИТО, 2009. 216 с.
6. Васин А.И., Дороднов А.М., Петросов В.А. О существовании вакуумной дуги с распределенным разрядом на расходоуемом катоде // Письма в ЖТФ. 1959. (5), 24. С.1499-1504.
7. Storf R. Hochverschleissteste Hartstoffschichten auf Hartmetall und Stahlwerkzeugen // Ind. – Anz. 1980. 102, № 34. S. 14-17.
8. Крейндель Ю.Е. Плазменные источники электронов. – М.: Энергоатомиздат, 1977.

The maximum size of the processed products is 800 mm.

Vacuum system of the equipment includes fore pump and diffusion pump with a pumping speed of 7000 l/s. The device is equipped with six high-performance electric arc plasma sources with magnetic system of arc discharge stabilization and of plasma flow focusing for coating. For surface pre-treatment by ion flux uses wide-aperture gas plasma source based on the thermionic discharge. Also the device is equipped with gas supply system with automatic maintenance of pressure in the chamber, temperature control system, automation systems.

PROSPECTS OF THE NEW TECHNOLOGY

New technology allows to replace other methods of physical vapor deposition. The structure of the coatings obtained with the use of the developed technology, is much more homogenous (no "den-drites"), the continuity of the coating is better, the boundary coating-substrate is poorly expressed due to the high adhesion to the monolithic material of the substrate base. High process stability ensures high yield.

In the project the Russian technologies are used. The new process allows to increase the resource of

turbopump units of power plants. Assessing the prospects, we can predict that the solution of the problem of increasing the service life of turbopumps of power plants with the possibility of forced operation provides the overall competitiveness of domestic production of such equipment. Thus, the further commercialization of this development and creation of technological equipment for hardening will allow the production of powerful domestic power plants and will increase the export potential of engineering in the segments of power generation units and equipment for hardening. ■