



СОВРЕМЕННЫМ КОНСТРУКЦИЯМ – ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ

ADVANCED MATERIALS AND TECHNOLOGIES FOR MODERN CONSTRUCTIONS

А.Титов*, к.ф.-м.н. / AOTitov@bochvar.ru
A.Titov, Ph.D.

При поддержке Топливной компании "ТВЭЛ" на базе передовых инновационных разработок в АО "ВНИИНМ им. А.А.Бочвара" создается современное промышленное производство функциональных наноструктурированных покрытий с использованием широкого спектра материалов, технологий и оборудования для их нанесения. Современный технологический комплекс призван стать одним из базовых элементов повышения эффективности, надежности и расширения эксплуатационных возможностей продукции для промышленности. ВНИИНМ успешно адаптирует "военные" технологии модификации поверхностей материалов для гражданской отрасли. Современные покрытия могут решать самые разные задачи: делать более прочным и долговечным оборудование для добычи нефти и газа, "залечивать раны" на деталях самолетов, улучшать качество эндопротезов...

Supported by the TVEL Fuel Company and based on the cutting-edge innovations, Bochvar High-technology Research Institute of Inorganic Materials (VNIINM) is setting up the up-to-date industrial production of functional nanostructured coatings with a wide range of materials, technologies and equipment for applying them. Modern technologies should become one of the basic elements to improve efficiency and reliability as well as expand the operational capabilities of products for industry. VNIINM successfully adapts the "military" technologies designed to surface to modify material surfaces for the civil sector. Modern coatings can solve a variety of tasks, e.g. make the oil and gas equipment stronger and more durable, 'heal the wounds' on the details of the aircraft and improve the quality of implants...

Наиболее слабым звеном системы "материал – рабочая среда", определяющим допустимые условия эксплуатации и ресурс всей системы, является поверхность материала, что предопределяет высокую значимость разработки методов и технологий модификации поверхностных слоев изделий. Самым эффективным методом направленной модификации поверхности материала является нанесение функциональных покрытий.

В настоящее время ВНИИНМ является одним из лидеров в России и в мире в области нанесения защитных и функциональных покрытий широкой сферы применения с использованием различных технологических процессов, которые позволяют выпускать изделия нового поколения с радикально улучшенным соотношением "цена/качество".

На базе передовых инновационных разработок ВНИИНМ, не имеющих отечественных аналогов,

создается современное промышленное производство функциональных наноструктурированных покрытий с использованием широкого спектра материалов, технологий и оборудования для их нанесения. Создаваемый технологический комплекс станет одним из базовых элементов возрождения отечественного машиностроения, повышения эффективности, надежности и расширения эксплуатационных возможностей машиностроительной продукции для ТЭК, нефтехимической и горнодобывающей промышленности, авиационного и энергетического турбостроения и других отраслей.

Также весьма важна проблема импортозамещения. Российский рынок слабо насыщен современным оборудованием для получения покрытий, так как соответствующие технологии всегда имели двойное назначение, а потому их экспорт в СССР и Россию был долгое время ограничен.

* ВНИИНМ им. А.А.Бочвара / VNIINM

Отечественные предприятия освоили производство простого оборудования для электродуговой металлизации и газопламенного напыления, однако сейчас его выпуск практически прекращен, а установки плазменного и высокоскоростного напыления на рынке до последнего времени присутствовали в основном в импортном исполнении.

По словам генерального директора ВНИИНМ Валентина Иванова, институт разработал для конверсионных применений более десятка технологий обработки поверхности, например, высокоскоростное ионно-плазменное магнетронное распыление (ВИПМР) и катодное распыление и газопламенную обработку в инертных средах. Также во ВНИИНМ применяются невакуумные методы: холодное газодинамическое напыление (ХГН), электроискровое легирование, микродуговое оксидирование, химико-термическая обработка в специальных средах, струйно-абразивная обработка, магнито-абразивная обработка, обработка "холодом" (ColdJet). В зависимости от поверхности

и поставленных задач могут наноситься керамические, металлические, композитные и другие материалы.

Специалисты-материаловеды и конструкторы института стараются решать стоящие перед промышленностью и народным хозяйством задачи по нанесению защитных и функциональных покрытий, выбирая наиболее эффективный, технологичный и экономичный метод.

ЗАЩИТА ПОВЕРХНОСТИ

Одним из эффективных методов нанесения функциональных или износостойких покрытий на новые изделия, а также восстановления изношенных деталей является холодное газодинамическое (ХГН) или сверхзвуковое воздушно-порошковое напыление, основанное на эффекте закрепления движущихся со сверхзвуковой скоростью и обладающих большой кинетической энергией твердых частиц при высокоскоростном ударе о поверхность изделия.

The weakest link in the "material - processing medium" system determining the permissible operating conditions and resources of the whole system is the surface of the material, which determines the high importance of the development of methods and technologies for the modification of the surface layers of products. The most effective way to directed modification of the material surface is the application of functional coatings.

Currently VNIINM is one of the leaders in Russia and globally in the field of application of protective and functional coatings of a wide range of application with a variety of processes that allow producing new-generation products with radical improvement in the price/quality ratio.

With the advanced innovations of VNIINM that have no domestic counterparts, a modern industrial production of functional nanostructured coatings

using a wide range of materials, technologies and equipment for their application is established. The created technology-based system will become one of the basic elements to restore the domestic machine-building sector, improve the efficiency, reliability, and enhance the operational capabilities of engineering products for fuel and energy, petrochemical and mining, energy and aviation turbine construction and other industries.

Import substitution is also very important. The Russian market is poorly saturated with up-to-date equipment for the production of coatings since the corresponding technology has always had a dual purpose, and therefore their exports to the Soviet Union and Russia for a long time been limited. Domestic enterprises have mastered the production of simple equipment for arc spraying and flame spraying, but now the production is virtually ceased; and

until recently the plasma coating and high-speed sputtering units have been imported.

According to the CEO of VNIINM Valentin Ivanov, they have developed over a dozen surface treatment technologies for the conversion applications, such as high-speed ion plasma magnetron sputtering, cathode spraying and flame treatment in an inert atmosphere. In addition, VNIINM uses non-vacuum methods, e.g. cold spray, electrospark doping, microarc oxidation, chemical and thermal treatment in special environments, abrasive blast treatment, magneto-abrasive treatment and ColdJet treatment. Depending on the surface and task, ceramic, metal, composite and other materials can be applied.

The expert in materials and designers of the Institute are trying to solve problems facing the industry and national economy that concern applying protective and functional coatings



Разработанные во ВНИИНМ технологии ХГН используют порошки металлов (алюминий, медь, цинк, никель, свинец, олово, баббит, железо, кобальт, ванадий, титан), сплавов или их механические смеси с керамическими порошками. Они позволяют наносить металлические и керамические покрытия не только на металлы, но и на стекло, керамику, камень, бетон, и даже на плотные органические материалы – углепластик, вакуумную резину, пластмассы.

В результате обработки поверхность приобретает требуемый комплекс характеристик: жаростойкость или жаропрочность, механическую износостойкость, антифрикционные свойства, коррозионную стойкость, радиопоглощение, электроизоляцию. Покрытия представляют собой однородный слой плотно упакованных деформированных металлических частиц с внедренными керамическими частицами.

На рис.1 и 2 представлены полуавтоматическая и роботизированная (автоматическая) установки для нанесения покрытий методом ХГН. Изменяя режимы работы оборудования, в автоматическом режиме проводится либо эрозионная обработка поверхности изделия, либо нанесение покрытий требуемых составов, пористости и толщины.

В ряде случаев для повышения коррозионной стойкости, жаростойкости и износостойкости покрытия необходимо формирование диффузионного (интерметаллидного) слоя путем термической обработки, режимы которой подбираются экспериментально. В некоторых случаях

после напыления и термообработки покрытие шлифуется до необходимого уровня шероховатости.

Метод ХГН достаточно известен и распространен, однако разработка технологии нанесения покрытий на конкретные детали и изделия является сложной технической задачей. ВНИИНМ успешно разрабатывает технологические схемы нанесения покрытий в зависимости от типа изделий, причем ряд способов запатентован.

В рамках работ по нанесению функциональных покрытий методом ХГН ВНИИНМ заключил 18 соглашений о сотрудничестве в авиационной, медицинской, буровой технике, судостроении, жилищно-коммунальном хозяйстве, железнодорожном транспорте, электротехнике и электронике (контактные площадки, высокотемпературная сверхпроводимость), а также в строительстве.

ЯДЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ НАРОДНОГО ХОЗЯЙСТВА

Одним из конверсионных проектов ВНИИНМ стало сотрудничество с префектурой СЗАО Москвы, направленное на внедрение новых технологий в сферу ЖКХ. Летом 2014 года была успешно проведена апробация нанесения металлических покрытий для оперативного ремонта и восстановления систем водоснабжения, и проект получил дальнейшее практическое продолжение. Специалисты ВНИИНМ продемонстрировали возможности метода ХГН по заращиванию повреждений на трубах.

by choosing the most effective, practically feasible and cost-effective methods.

SURFACE PROTECTION

An effective method of application functional and wear-resistant coatings on new products, as well as the restoration of worn parts is cold spray or supersonic air-and-powder spraying based on the effect of fixing solid particles that move with supersonic speed and have a high kinetic energy at high velocity impact on the product surface.

Cold spray technologies developed in VNIINM use metal

powders (aluminium, copper, zinc, nickel, lead, tin, babbitt, iron, cobalt, vanadium and titanium), alloys or their mechanical mixtures with ceramic powders. They allow to apply metallic and ceramic coatings not only on metals but also on glass, ceramics, stone, concrete and even dense organic materials, i.e. carbon fibres, vacuum rubber and plastics.

As a result of treatment, the surface acquires the desired characteristics, heat resistance, mechanical durability, anti-friction properties, corrosion resistance, radar absorption and

electrical insulation. The coatings are a uniform layer of densely packed and deformed metal particles with embedded ceramic particles.

Fig. 1 and 2 show a semi-automated and robotic (automated) cold spray coater. By changing the mode of operation of the equipment, the product surface automatically undergoes either the erosional treatment or coating of the desired composition, porosity and thickness.

In some cases, to improve the corrosion resistance, heat resistance and wear resistance of coating it is necessary to create



Рис.1. Полуавтоматическая установка нанесения покрытий методом ХГН: 1 – камера; 2 – манипулятор с образцами; 3 – сверхзвуковое сопло; 4 – порошок питатель; 5 – компрессор

Fig.1. Semi-automatic equipment for cold spray: 1 – chamber, 2 – manipulator with samples; 3 – supersonic nozzle; 4 – powder feeder; 5 – compressor

Ремонт повреждений проводился без перекрытия магистрали, при этом отремонтированная область успешно выдерживала перепады давлений.

СВЕРХЗАДАЧИ ДЛЯ "СВЕРХЗВУКА"

Коррозионные повреждения являются одним из массовых эксплуатационных повреждений "ста-

реющих" воздушных судов, поэтому актуальна разработка технологии, позволяющей качественно и эффективно проводить ремонт и восстановление элементов конструкции планера силами эксплуатирующей авиационную технику организаций.

Совместно с Государственным научно-исследовательским институтом гражданской авиации (ГосНИИГА) ВНИИНМ проводит работы по экспериментальной оценке эффективности восстановления пораженных коррозией конструкционных алюминиевых сплавов для поддержания летной годности воздушных судов. На первом этапе работ специалисты ВНИИНМ проводят предварительную оценку влияния состава порошковой смеси и выбранной технологии восстановления материала на статистическую прочность и упругость путем испытаний образцов на растяжение при статическом нагружении. В качестве объекта исследования был выбран листовой конструкционный алюминиевый сплав 1163РДТВ (на базе системы Al-Cu-Mg), применяемый в конструкциях современных воздушных судов.

Для восстановления конструктивных элементов учеными ВНИИНМ разработана и применена технология сверхзвукового воздушно-порошкового напыления материалов, "залечивающая" дефекты поверхности в сочетании с механической обработкой (абразивная обработка и шлифование). Технологический процесс включает подготовку поверхности изделия к напылению; восстановление повреждений при помощи сверхзвукового напыления порошковой композиции на соответ-

a diffusion (intermetallic) layer through heat treatment, the modes of which are chosen experimentally. In some cases, after spraying and heat treatment, coating is ground to a desired level of roughness.

The cold spray method is well-known and common but it is quite a challenging technical objective to develop technologies to place coating on specific parts and products.

VNIINM has successfully developed coating process diagrams depending on the type of products, and some of the methods are patented.

As part of functional coating with the cold spray method, VNIINM has entered into 18 agreements on cooperation in aviation, medical, drilling equipment, shipbuilding, housing maintenance and utilities services, railway transport, electrical engineering and electronics (termination pads, high-temperature superconductivity) and construction.

NUCLEAR TECHNOLOGY FOR HOUSING AND COMMUNAL SERVICES

One of the VNIINM conversion projects was designed to cooperate

with the prefecture of the North-West Administrative District of Moscow aimed at introducing new technologies in the housing maintenance and utilities sector. In the summer of 2014 some tests were successfully carried out with regard to metal coating for rapid repair and restoration of water supply systems; and the project was extended with a practical effect. VNIINM experts demonstrated the feasibility of the cold spray method to refill the pipe damages. Damage was repaired without blocking any lines while the repaired section can successfully withstand pressure differentials.



ствующие участки; выравнивание поверхности; дополнительную обработку поверхности; финишное сверхзвуковое воздушно-порошковое напыление порошковых композиций.

Все перечисленные работы могут проводиться в ручном режиме на территории заказчика, эксплуатирующего авиационную технику. Кроме того, разрабатываемый ВНИИИМ мобильный комплекс ХГН весом менее 25 кг позволит восстанавливать повреждения в полевых условиях.

Полученные результаты доказывают, что коррозионные повреждения эффективно "залечиваются", причем при правильном подборе состава порошковой композиции и режима ее напыления, покрытие в восстановленной зоне не разрушается вплоть до предела текучести и выше, а его упругие и пластические свойства максимально соответствуют свойствам основного материала.

НАНОСТРУКТУРЫ – ПРОИЗВОДСТВУ!

Широкий спектр задач, которые стоят перед инженерами и конструкторами в области создания функциональных и защитных покрытий, требует новых подходов. Эффективным методом модификации поверхности является высокоскоростное ионно-плазменное магнетронное распыление (ВИПМР). В данном случае материал, который необходимо нанести на поверхность детали или изделия, размещается на катоде специального устройства и распыляется в среде аргона при остаточном давлении $1...10^{-1}$ Па. Под действием

бомбардировки ионами аргона с поверхности катода генерируется поток атомов, который переносится на поверхность изделия и осаждается, образуя покрытие. Процесс нанесения покрытия осуществляется на специальных вакуумных установках. Это универсальный способ, позволяющий получать наноструктурированные покрытия из различных материалов: металлов, сплавов, композитов, химических соединений и керамики, причем состав покрытия определяется составом исходной мишени для распыления. Скорость осаждения в высокоскоростном режиме при расстоянии между мишенью и деталью 50–60 мм для различных материалов составляет от 20 до 150 мкм/час.

С помощью данного метода можно эффективно и экономично решать следующие научно-технические задачи:

- повышение жаростойкости и жаропрочности лопаток турбин газотурбинных двигателей (ГТД) пятого поколения для авиации и кораблей благодаря применению многослойных многокомпонентных покрытий на основе алюминидов и алюмоциркония, комплексно легированных элементами, которые стабилизируют, с одной стороны, образование защитных оксидов, а с другой – жаропрочность материала основы и покрытия;
- увеличение ресурса работы элементов компрессоров ГТД, топливной аппаратуры гидравлических систем, элементов механизации крыла, турбореактивных двигателей самолетов и ракет за счет применения композиционных

OVERARCHING SUPERSOUND GOALS

Corrosion damage is one of the mass operation-related damages of the 'aging' aircraft, so it is the right time to develop a technology allowing to efficiently and effectively carry out repairs and restoration of airframe components by companies that operate the aviation equipment.

In cooperation with the State Research Institute of Civil Aviation (GosNIIGA) VNIINM has been working on an experimental evaluation of the effectiveness of structural restoration of the corroded aluminium

alloys to maintain the airworthiness of an aircraft. At the initial stage, VNIINM experts conduct a preliminary assessment of the impact from the composition of the powder mixture and the chosen material recovery technology on the statistical strength and elasticity by specimens tensile testing under static loading. The structural duralumin (based on AL-Cu-Mg) used in the modern aircraft design was chosen as the test object.

To restore the structural elements by VNIINM researchers, the supersonic air-powder material coating technology that can

'heal' surface defects in conjunction with mechanical treatment (abrasion and polishing) was developed and applied. The process includes preparing the surface of the product to spraying; repair of damage by supersonic spraying the powder composition on corresponding sections; leveling the surface; additional surface treatment; finishing supersonic air-powder coating with powder compositions.

All of these works can be carried out manually on the site of the client operating the aviation equipment. In addition, the mobile cold spray system



Рис.2. Роботизированная установка нанесения покрытий методом ХГН

Fig.2. Automatic equipment for cold spray

покрытий, в том числе износостойких, твердосмазочных, коррозионностойких с ультрадисперсной структурой;

- повышение ресурса работы, жаростойкости и жаропрочности клапанно-поршневой пары

двигателя внутреннего сгорания (ДВС), топливной аппаратуры дизельных ДВС и других элементов автомобиля путем применения многослойных многокомпонентных покрытий на основе жаропрочных сплавов с высокими коррозионными и светоотражающими свойствами;

- нанесение твердосмазочного, антисхватывающего покрытия на зубчатые передачи сильно нагруженных редукторов для снижения расхода энергии, повышения надежности и снижения уровня шума;
- нанесение твердосмазочного, антисхватывающего покрытия на элементы подшипников скольжения дизельных двигателей всех типов для снижения расхода топлива, повышения мощности, повышения надежности, снижения уровня шума;
- нанесение покрытий на высокоскоростные подшипники качения, резьбовые соединения бурильных труб, резьбовые соединения быстроразборных систем и т.д.;
- частичная замена экологически вредных химических и гальванических технологий, применяемых для защиты от коррозии и придания декоративных свойств изделиям автотехники, путем применения многокомпонентных



покрытий на основе нержавеющей стали, сплавов системы "алюминий-хром" и других с высоким сопротивлением коррозии и хорошими светоотражающими свойствами.

Следует отметить, что решение каждой конкретной задачи по нанесению покрытия на изде-

лие или деталь требует индивидуального подхода, метода и технологии напыления материала. Для достижения наилучшего результата ученые ВНИИНМ совместно с конструкторами и разработчиками комбинируют различные методы модификации поверхности изделия. ■

developed by VNIINM with a weight of less than 25 kg will allow repair damage in the field.

These results obtained show that corrosion damage can be effectively 'healed' and given the right composition of the powder composition and its right deposition, coating in the repaired area is not destroyed until the yield point or higher is reached; and its elastic and plastic properties maximally correspond to the properties of the base material.

NAANOSTRUCTURES FOR INDUSTRY!

A wide range of challenges faced by engineers and designers in the field of functional and protective coatings require new approaches. High-speed ion plasma magnetron sputtering is an effective method of modifying the surface. In this case, the material to be applied to the surface of parts or products is placed at the cathode of a special device and is sprayed in the argon atmosphere at a residual pressure of $1 \dots 10^{-1}$ Pa. Under the influence of bombardment with argon ions, a flow of atoms is generated from the cathode which is carried on the surface of the product and is deposited to form the coating. The coating process is carried out on special vacuum units. It is a multiple-purpose method allowing to obtain nanostructured coatings from various materials

such as metals, alloys, composites, ceramics and chemical compounds, wherein the coating composition is determined by the composition of the initial target for sputtering. The deposition rate in the high-speed mode with the distance between the target and part of 50-60 mm for various materials is between 20 and 150 microns/hour.

With this method you can effectively and efficiently address the following scientific and technology-related objectives:

- improve the heat resistance of the turbine blades of gas turbine engines (GTE) the fifth-generation for aircraft and ships by the use of multi-layer and multi-component coatings based on aluminide and aluminozirconium wholistically alloyed with elements that, on the one hand, stabilise the formation of protective oxides, on the other hand, the heat resistance of the material base and coating;
- increase in the service life of the GTE compressor components, fuel injection equipment of hydraulic systems, wing wings, turbojet engines for aircraft and rocket vehicles through the use of composite coatings including those that are wear-resistant, solid lubricating and corrosion-resistant with the ultra-fine structure;
- increase in the service life, heat resistance of the

valve-piston pair of the internal combustion engine (ICE), ICE diesel fuel equipment and other elements of the vehicle through the use of multi-layer and multi-component coatings based on high-temperature alloys with high corrosion and reflective properties;

- apply the solid lubricant coating, antiprehensive coating on gears of the heavily loaded gears to reduce energy consumption, improve reliability and reduce noise;
- apply coatings on high-speed rolling bearings, threaded joints of drill pipes, threaded joints of quick-detachable systems etc.;
- partially replace the environmentally harmful chemical-and-electrochemical technologies used for corrosion protection and creation of decorative properties for the motor vehicle products through the use of multi-component coatings based on stainless steel, "aluminium-chromium" alloys and others with high corrosion-resistance and light-reflecting properties.

It should be noted that the accomplishment of each specific task of coating on a product or item requires an individual material spraying approach, method or technology. For best results, the VNIINM scientists together with designers and developers combine different methods of modifying the surface of a product. ■

