



Aleksandr N. Dubovoy
Дубовой
Александр
Николаевич

УДК 621.793.7
В 57

INFLUENCE OF ELECTRIC IMPULSE IMPACT ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF PLASMA COATINGS

**ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ
НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ**

DOI 10.15589/SMI. 2015.01.04

Aleksandr N. Dubovoy А. Н. Дубовой, д-р техн. наук, проф.
oleksandr.dubovyj@nuos.edu.ua
ORC ID: 0000-0002-2843-1879

Anton A. Karpechenko А. А. Карпеченко, канд. техн. наук
anton.karpechenko@nuos.edu.ua
ORC ID: 0000-0002-7543-4159

Maksim N. Bobrov М. Н. Бобров, асп.;
laborantmtm@gmail.com
ORC ID: 0000-0002-9098-6912

Aleksandr A. Novikov А. А. Новиков, магистрант
131030@nuos.edu.ua
ORC ID: 0000-0003-2130-5236



Anton A. Karpechenko
Карпеченко
Антон
Анатольевич

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Nikolaev

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, г. Николаев

Abstract. The appliance of electropulse impact on the spraying distances to enhance the properties of plasma sprayed coatings is discussed. The aim of research is to set the impact of high-voltage electrical pulses on the process of applying the plasma coatings and their mechanical properties. The structure and mechanical properties such as hardness, bond strength, wear resistance of bronze plasma sprayed coating obtained using the electropulse impact are studied experimentally. The effect of the enhancement of mechanical properties of coatings obtained by grinding their structure and improving the speed of sprayed particles are set. The research results can be applied in the technology of repair and restoration of machines elements and mechanisms. The fixed effect allows us solving the problem of providing the high quality plasma sprayed coatings.

Keywords: electric impulses; plasma coating; hardness; wear resistance; structure.

Аннотация. Исследовано влияние наложения электрических импульсов при плазменном напылении на механические свойства покрытий.

Ключевые слова: электрические импульсы; плазменное покрытие; твердость; износостойкость; структура.

Анотація. Досліджено вплив накладання електричних імпульсів при плазмовому напилюванні на механічні властивості покриттів.

Ключові слова: електричні імпульси; плазмове покриття; твердість; зносостійкість; структура.

References

Dubovoy A. N., Ovsyannikov V. N., Karpechenko A. A., Bobrov M. N., Ovsyannikova K. V. Vliyanie elektricheskikh impulsov na strukturu i tverdst elektrodugovykh pokrytyy [Influence of Electrical Pulses on Structure and Hardness of Electric Arc Coatings]. *Sbornik nauchnykh trudov NUK* [Collection of Scientific Publications of NUS], 2012, vol. 5–6, pp. 38–41.

Voronov A. V. Sozdanie nanostrukturnykh sostoyaniy v poverkhnostnykh sloyakh kombinirovannym metodom ionnoy implantatsii – magnetronnogo raspyleniya – ultrazvukovoy obrabotkoy [Development of Nanostructured States in Surface Coatings Using Combined Method of Ion Implantation of Magnetron Sputtering by Sonication]. *Fizicheskaya mezomekhanika — Physical Mesomechanics*, 2005, no. 8, pp. 113–116.



Maksim N. Bobrov
Бобров
Максим
Николаевич



Aleksandr A. Novikov
Новиков
Александр
Александрович

Borisov Yu.S., Kharlamov Yu.A., Sidorenko S.L. *Gazotermicheskiye pokrytiya iz poroshkovykh materialov* [Gas-thermal Sprayed Coatings from Powder Materials]. Kyiv, Naukova dumka Publ., 1987. 544 p.

Grigoryev A. I. Kapillyarnye elektrostatische neustoychivosti [Capillary Electrostatic Instability]. *Sorosovskiy obrazovatelnyy zhurnal — Soros Educational Journal*, 2000, vol. 6, no. 6, pp. 37–43.

Grigoryev A. I. Elektrodispersionnyye zhidkosti pri realizatsii kolebatelnoy neustoychivosti yeye poverkhnosti [Liquid Electrodispersion in case of Implementation of Oscillatory Instability of its Free Surface]. *Zhurnal tehnikeskoy fiziki — Journal of Technical Physics*, 2000, vol. 70, no. 5, pp. 22–27.

Gutman B. E. Izmelcheniye kapel pri plazmennom napylenii s modulyatsiyey toka [Grinding of Drops in case of Plasma Spraying with Current Modulation]. *Avtomaticheskaya svarka — Automatic welding*, 1988, issue 9, no. 420, pp. 37–39.

Gutman B. E. O mekhanizmax, vliyayushchikh na parametry plazmennyykh pokrytiy v modulirovannoy plazmennoy duge [About Mechanisms which Influence on Plasma Coatings Parameters in Modulated Plasma Arc]. *Svarochnoe proizvodstvo — Svarochnoe proizvodstvo*, 1986, issue 8, pp. 36–38.

Kadymetov A. M. Issledovanie protsessov plazmennogo nanoseniya i uprochneniya pokrytiy i puti upravleniya ikh kachestvom [Processes Research of Plasma Plotting and Coatings Hardness and Ways of Control of their Quality]. *Nauchnyy zhurnal KubGAU — Scientific journal of Kuban State Agrarian University*, 2012, no. 81, pp. 1–18.

Kalita V. I., Samohin A. V., Alekseev N. V. et al. Plazmennyye pokrytiya s nanorazmernym karbonitridom titana [Plasma Coatings with Nanosized Particles of Titanium Carbonitride]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov — Physics and chemistry of materials processing*, 2007, vol. 2, pp. 37–45.

Korotkikh V. M. Upravlyaemye energoefektivnyye tekhnologii plazmennogo napyleniya zashchitnykh pokrytiy selskokhozyaystvennogo naznacheniya [Controlled Power Effective Technologies of Plasma Spraying of Protecting Coatings of Agricultural Purpose]. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of Altay State Agrarian University], 2011, issue 8, no. 82, pp. 83–87.

Galyshkin N. V., Korotkikh V. M. Ustanovka plazmennogo napyleniya [Machinery of Plasma Coating] Patent RU, no. 2335347, 2007.

Petrov S. V., Karp I. N. *Plazmennoye gazovozdushnoye napyleniye* [Plasma Air-gas Coating]. Leningrad, Mashinostoeniye Publ., 1986. 253 p.

Kalita V. I. Fizika, khimiya i mekhanika formirovaniya pokrytiy, uprochnennykh nanorazmernymi fazami [Physics, Chemistry and Mechanics of Formation of Coatings Hardened by Nanosized Phases]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov — Physics and chemistry of materials processing*, 2005, vol. 4, pp. 46–57.

Kurakova N. V., Molokanov V. V. et al. Formirovanie plazmennyykh pokrytiy s nano i amorfnoy strukturoy [Formation of Plasma Coatings with Nano and Amorphous Structure]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov — Physics and chemistry of materials processing*, 2007, vol. 4, pp. 36–39.

Khasuy A. *Naplavka i napyleniye* [Surfacing and Spraying]. Moscow, Mashinostoeniye Publ., 1985. 240 p.

Problem statement. The improvement of the reliability and service life of machine parts and their assemblies remains an urgent issue, which is being solved predominantly with the functional coating application methods of gas thermal spraying (GTS) at the present stage of development of science and technology. Among various methods of GTS the plasma one is characterized by the possibility of refractory materials coating, high performance, versatility and affordability. But along with this it has its drawbacks: porosity, low adhesive and cohesive strength [12].

The main ways to improve the mechanical properties of plasma coatings are related to the additional technological operations maintaining or modifications in equipment: coatings melting, thermomechanical and electromechanical processing, coatings spraying with a nanocrystalline phase, development of supersonic jets and protecting related flows [2, 9, 10, 13, 14]. These methods have significant drawbacks associated with the significant increase in the covering cost at the expense of additional power consumption.

Постановка проблемы. Повышение надежности и ресурса работы деталей машин и их узлов остается актуальной проблемой, которая на современном этапе развития науки и техники решается преимущественно нанесением функциональных покрытий методами газотермического напыления (ГТН). Среди различных методов ГТН плазменный характеризуется возможностью нанесения покрытий из тугоплавких материалов, высокой производительностью, универсальностью и экономичностью. Но наряду с этим ему присущи недостатки: пористость, низкая адгезионная и когезионная прочность [12].

Основные пути повышения механических свойств плазменных покрытий связаны с проведением дополнительных технологических операций или с доработками в оборудовании: с оплавлением покрытий, термомеханической и электромеханической обработкой, напылением покрытий с нанокристаллической фазой, созданием сверхзвуковых струй и защитных сопутствующих потоков [2, 9, 10, 13, 14]. Эти методы имеют существенные недостатки, связанные со значительным повышением стоимости покрытий за счет дополнительных энергозатрат.

Latest research and publications analysis. The effect of imposing a constant arc current of short impulses (the so-called modulation) during the plasma coating process was investigated in [6–8]. It is shown that during the modulation the plasma torch becomes the source of the impulse waves which interact with the sprayed particles under its flight on the spraying distance. It provides the size reduction of the additional particles and their velocity increase. The effect of application of high-voltage electric impulses between the metallizer and the substrate on the structure and hardness of electric arc coatings was studied in [1]. It was found that under the electric impulse treatment the grinding of the coating structure and the increase of their hardness was considered.

THE ARTICLE AIM is to study the electric impulse treatment on the process of the plasma coatings imposition and their mechanical properties.

Basic material. The coatings were applied on the apparatus for Kiev-7 plasma spraying, which was staffed by the PUN-1 plasmatron. Air was used as the plasma forming and transmission gas, powders with dispersion of 40...80 micron of the ПГ-19М-01 40...80 mm and ПРХ18Н9 models were used as the spraying material. The coatings with the thickness of 1.0...1.2 mm were applied to the St3 steel samples with dimensions of 5×25×40 mm which were defatted and exposed to abrasive-jet blasting before spraying. The hardness was measured on the Vickers type apparatus (DSTU ISO 6507-4:2008) with a load of 5 kg. The metallographic research was carried out on the optical MMU-3 microscope. The pictures of microstructures were obtained with the digital Delta Optical HDCE-20C camera, pre-packaged with the Scope Image 9.0 software. The porosity determination was performed using the software complex for the MEGHAN metallographic computer analysis. The pictures of the plasma jet for determination of the velocity of the particles were obtained with the digital Canon PowerShot SX40HS camera. The abrasive resistance of plasma coatings was determined on the SMC-2 friction machine, the adhesion strength of coatings with the substrate — on the УММ-5 tensile testing machine.

Research results and analysis. The coatings spraying was carried out at fixed modes. The mode settings for the ПГ-19М-01 powder were: the arc current was 130 A, the voltage was 190 V, the distance was 180 mm. For the ПРХ18Н9 powder the amperage arc was 170 A, the voltage was 180 V, the distance was 180 mm [3]. The optimal parameters of electric impulse treatment were selected by the authors on the examples of electric arc coatings [1] and were as follows: the impulse amplitude was 5 kV, the frequency was 6.5 kHz. The connection of the high-voltage impulses source was performed in a straight diagram (Fig. 1).

As a result of the high-voltage electrical impulses overlay the hardness of plasma coatings of the ПГ-19М-01 and ПРХ18Н9 powders increased by 20 and 25 % respectively. The microstructures analysis (Fig. 2) indicates that the use of electric impulse impact leads to

Анализ последних исследований и публикаций. Влияние наложения на постоянный ток дуги коротких импульсов (так называемая модуляция) при плазменном нанесении покрытий исследовано в работах [6–8]. Показано, что при модуляции плазматрон становится источником ударных волн, которые взаимодействуют с напыляемыми частицами при полете их на дистанции напыления. Это обеспечивает дополнительное измельчение частиц и увеличение их скорости. Влияние наложения высоковольтных электрических импульсов между металлизатором и подложкой на структуру и твердость электродуговых покрытий исследовано в [1]. Установлено, что при электроимпульсном воздействии наблюдается измельчение структуры покрытия и повышение их твердости.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ — исследование электроимпульсного воздействия на процесс нанесения плазменных покрытий и их механические свойства.

Изложение основного материала. Покрытия наносили на установке для плазменного напыления Киев-7, которая укомплектована плазматроном ПУН-1. В качестве плазмообразующего и транспортировочного газа использовали воздух, в качестве напыляемого материала — порошки дисперсностью 40...80 мкм марок ПГ-19М-01 и ПРХ18Н9. Покрытия толщиной 1,0...1,2 мм наносили на образцы из стали марки Ст3 размером 5×25×40 мм, которые перед напылением подвергали обезжириванию и струйно-абразивной обработке. Твердость измеряли на приборе типа Виккерс (ДСТУ ISO 6507-4:2008) при нагрузке 5 кг. Металлографические исследования проводили на оптическом микроскопе ММУ-3. Снимки микроструктур получали цифровой камерой Delta Optical HDCE-20C, укомплектованной программным обеспечением Scope Image 9.0. Определение пористости проводили с помощью программного комплекса для металлографического компьютерного анализа MEGHAN. Снимки плазменной струи для определения скорости частиц получали с помощью цифровой фотокамеры Canon PowerShot SX40HS. Износостойкость плазменных покрытий определяли на машине трения СМЦ-2, прочность сцепления покрытий с подложкой — на разрывной машине УММ-5.

Результаты исследований и их анализ. Напыление покрытий проводили на фиксированных режимах. Для порошка ПГ-19М-01 параметры режима составляли: сила тока дуги — 130 А, напряжение — 190 В, дистанция — 180 мм. Для порошка ПРХ18Н9: сила тока дуги — 170 А, напряжение — 180 В, дистанция — 180 мм [3]. Оптимальные параметры электроимпульсного воздействия были выбраны авторами на примере электродуговых покрытий [1] и составляли: амплитуда импульсов — 5 кВ, частота — 6,5 кГц. Подключение источника высоковольтных импульсов осуществляли по прямой схеме (рис. 1).

В результате наложения высоковольтных электрических импульсов твердость плазменных покрытий из порошков ПГ-19М-01 и ПРХ18Н9 повысилась на 20 и 25 % соответственно. Анализ микроструктур (рис. 2) свидетельствует, что использование электроимпульсного воздействия приводит к измельчению

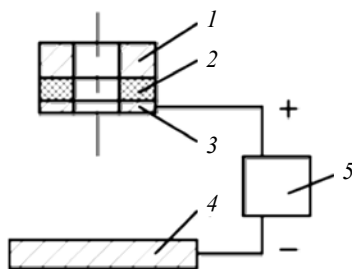


Fig. 1. Straight Connection Diagram of the High-voltage Impulses Source under Plasma Spraying:

Рис. 1. Прямая схема подключения источника высоковольтных импульсов при плазменном напылении:

1 — anode / анод; 2 — fluoroplastic non-conductor / фторопластовый изолятор; 3 — steel ring / стальное кольцо; 4 — sample / образец; 5 — high-voltage impulses source / источник высоковольтных импульсов

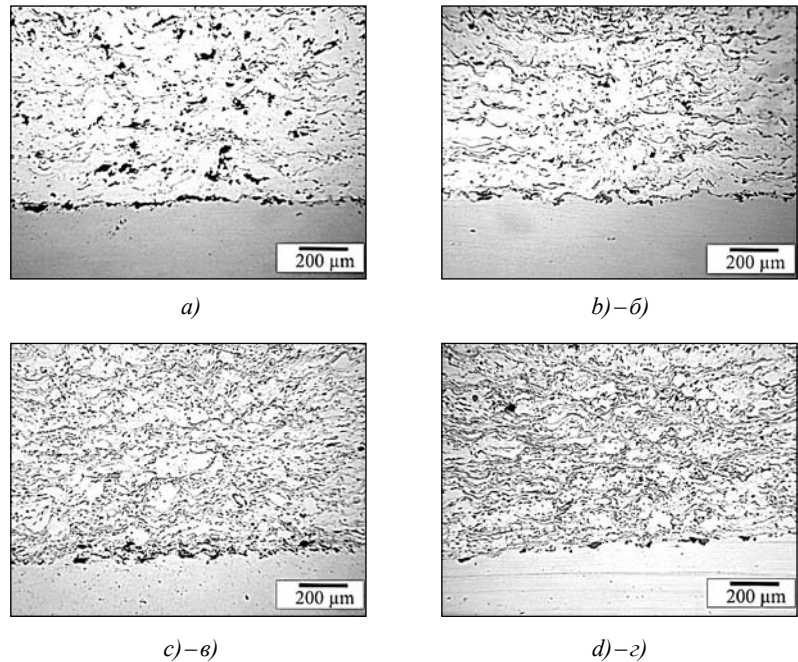


Fig. 2. Plasma Coatings Microstructures:

Рис. 2. Микроструктуры плазменных покрытий:

a) — from the ПГ-19М-01 Powder without the Imposition of Current Impulses / из порошка ПГ-19М-01 без наложения импульсов тока; b)–б) — from the ПГ-19М-01 Powder with the Imposition of Current Impulses of 5 kV Amplitude, 6.5 kHz Frequency / из порошка ПГ-19М-01 с наложением импульсов тока амплитудой 5 кВ, частотой 6,5 кГц; c)–в) — from the ПРХ18Н9 Powder without the Imposition of Current Impulses / из порошка ПРХ18Н9 без наложения импульсов тока; d)–д) — from the ПРХ18Н9 Powder without the Imposition of Current Impulses of 5 kV Amplitude, 6.5 kHz Frequency / из порошка ПРХ18Н9 с наложением импульсов тока амплитудой 5 кВ, частотой 6,5 кГц

the grinding of the structural elements of the covering: the average height of slats for the bronze coating decreases from 15 to 10 microns, for stainless steel — from 12 to 9 microns. There is also a decrease in the porosity of the coatings from 6 to 4% and from 4 to 2.7% respectively.

To explain this effect, the study of the influence of electric impulse impact on the particles velocity during plasma spraying has been conducted. The velocity determination was performed using the method of high-speed digital imaging [12, 15] on the example of the ПГ-19М-01 powder coating. The particle velocity can be roughly determined if the length of its track and the exposure time of shooting are given. When selecting the exposure indicators during shooting the probability of the particles velocity increase under the electric impulse impact was taken into account. The track length is directly proportional to the velocity which makes inconveniences while their identification in the plasma jet due to its radiation. According to the photographs (Fig. 3) the tracks can be identified only on the periphery of the jet.

In this regard, to find the axial velocity of the particles the following formula was used [12]

$$V_0 = \frac{V}{[1 - (y/b)^{3/2}]^2},$$

структурных элементов покрытия: средняя высота ламелей для бронзового покрытия уменьшается с 15 до 10 мкм, для нержавеющей — с 12 до 9 мкм. Наблюдается также снижение пористости покрытий с 6 до 4% и с 4 до 2,7% соответственно.

Для объяснения данного эффекта провели исследования влияния электроимпульсного действия на скорость частиц при плазменном напылении. Определение скорости проводили с помощью метода скоростной цифровой фотосъемки [12, 15] на примере нанесения порошка марки ПГ-19М-01. Скорость частицы приблизительно можно определить, если известны длина ее трека и время экспозиции съемки. При выборе показателей экспозиции при съемке учитывали вероятность увеличения скорости частиц при электроимпульсном воздействии. Длина треков прямо пропорциональна скорости, что создаст неудобства при их идентификации в плазменной струе за счет ее излучения. По снимкам (рис. 3) можно идентифицировать треки только на периферии струи.

В связи с этим для нахождения осевой скорости частиц использовали формулу [12]

$$V_0 = \frac{V}{[1 - (y/b)^{3/2}]^2},$$

where V , V_0 are the particles velocities in the current point and on the flow axis; y is the distance from the jet axis to the current point; b is the half-width of the jet in the given section (for spraying without the imposition of the electrical impulses it is 18 mm, with the imposition of the current impulses it is 15 mm).

The average flight approach velocity of the particles along the jet axis at the distance of 180 mm during the deposition by the traditional technology was 143.6 m/s, using the electric impulse impact it was 180.3 m/s. Therefore, under the imposition of the high-voltage electric impulses of 5 kV voltage and 6.5 kHz frequency, the particles velocity increase of 25% is considered.

This phenomenon can be described as follows. Plasma is the partially ionized gas. The influence of the external impulse electric field can be summarized by saying that the electrons begin to move in the opposite direction to the field strength vector, and the positively charged ions begin to move in the direction of this vector [12], i. e. in the straight connection diagram of the impulse current source the electrons move in the direction of the sprayed surface and the positively charged ions move towards the powder particles. As a result of the collision of charged particles with the powder particles the last ones acquire a charge. If an electrically charged liquid drop is placed into the electric field, then at a certain charge and field strength it will be instable. It will occur when the surface density of the Coulomb forces of repulsion of conductive fluid electric charges exceeds the surface tension forces [4, 5]. Under the action of electrostatic forces the drop splits. The drops shredding during plasma spraying is stimulated at the resonance medium frequency and the drop itself [12]. In this research it is only possible due

где V , V_0 — скорости частиц в данной точке и на оси потока; y — расстояние от оси струи к данной точке; b — полутолщина струи в данном сечении (для напыления без наложения электрических импульсов — 18 мм, с наложением импульсов тока — 15 мм).

Средняя подлетная скорость частиц по оси струи на дистанции 180 мм при напылении по традиционной технологии составила 143,6 м/с, с использованием электроимпульсного действия — 180,3 м/с. Следовательно, при наложении высоковольтных электрических импульсов напряжением 5 кВ, частотой 6,5 кГц наблюдается повышение скорости частиц на 25%.

Это явление можно объяснить следующим. Плазма — частично ионизированный газ. Влияние внешнего импульсного электрического поля сводится к тому, что электроны начинают двигаться в направлении, противоположном направлению вектора напряженности поля, а положительно заряженные ионы — в направлении этого вектора [12], т. е. при прямой схеме подключения источника импульсного тока электроны двигаются в направлении напыляемой поверхности, а положительно заряженные ионы — навстречу частицам порошка. В результате столкновения заряженных частиц с частицами порошка последние приобретают заряд. Если заряженную электропроводную каплю жидкости поместить в электрическое поле, то при определенном заряде и напряженности поля она испытывает неустойчивость, которая возникает, когда поверхностная плотность кулоновских сил отталкивания электрических зарядов проводящей жидкости превышает силы поверхностного натяжения [4, 5]. Под действием электростатических сил капля распадается. Измельчение

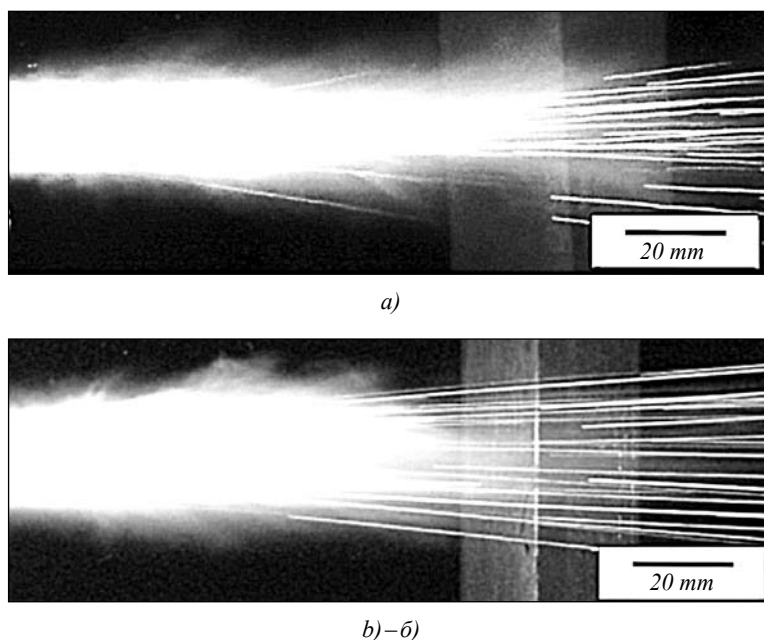


Fig. 3. Shootings of the Plasma Jet under Spraying with the ПГ-19М-01 Powder:

Рис. 3. Снимки плазменной струи при напылении порошком ПГ-19М-01:

a) — without the Imposition of Electrical Impulses (3.125 mx Exposure) / без наложения электрических импульсов (экспозиция 3,125 мкс); b)–б) — with the Imposition of the Current Impulses of 5 kV Voltage, 6.5 kHz Frequency (0.625 mx Exposure) / с наложением импульсов тока напряжением 5 кВ, частотой 6,5 кГц (экспозиция 0,625 мкс)

to the resonance of the natural oscillations of the drop and the external electric field because under the subsonic velocity of the plasma jet the effect of the plasma ripples on particle size reduction is absent [12]. Thus, the phenomenon of particle size reduction under plasma spraying with electric impulse impact can be explained by the charge of powder particles in the plasma flow and the occurrence of electrostatic forces as a part of the resonance with the natural oscillations of the drop.

Under the powder particles grinding function of the particle size distribution shifts towards the reduction of their average diameter. Associated with the grinding, the reduction of inertia of the particles causes an increase in their average rate, and the decrease of the standard deviation from the average diameter reduces the velocity spread [12]. All this ensures the uniform particle packing and the porosity reduction (see Fig. 2). The authors of [10, 11] explain the acceleration of particles during plasma spraying using an additional current source by the additional rate [11]:

$$V_2 = \sqrt{\frac{2q \cdot \Delta\phi}{m}},$$

where q is the particle charge; $\Delta\phi$ is the potentials difference between the plasma torch and sprayed surface; m is the particle mass.

Thus, it was found that the usage of electric impulse impact provides possession of the grinded and denser microstructure of the plasma coatings by means of the additional shredding and particle acceleration in the plasma jet.

To determine the performance properties of the coatings the tests for abrasive resistance and adhesion to the substrate were conducted. The abrasive resistance of plasma coatings was defined on the CMIQ-2 friction machine by the rollerblock scheme (Fig. 4, a). For lubrication of the friction couple the M10Г2К ГОСТ 8581-75 motor oil was used. The oil feed rate was 30 drops per minute, the circumferential speed of the roller rotation was 0.8 m/s, the pressure was 5 MPa.

The block and the roller were made of 45 carbon structural qualified steel. The plasma coating was applied to the block, previously defatted with technical ethanol and subjected to abrasive-jet blasting. Before the abrasion test the rollers were subjected to thermal improvement. The tempering of the steel rollers was carried at a temperature of 840 °C and subjected to holding for 5 min. The cooling was carried in the water. After the tempering the hardness of rollers was 54...55 HRC. Then, the high temperature tempering at a temperature of 550 °C, holding for 1 hour and cooling in air was performed. The hardness of the rollers after the high temperature tempering was 30...32 HRC.

Analysis of the results of determination of the abrasive resistance of plasma coatings of the ПГ-19М-01 powder showed that the coating obtained with the imposition of high-voltage electrical pulses of the voltage of 5 kV, frequency of 6.5 kHz is 1.5 times less abrasive resistant than coatings produced by means of the traditional

капель при плазменном напылении стимулируется при резонансных частотах колебаний среды и самой капли [12]. В данном исследовании это возможно только за счет резонанса собственных колебаний капли и внешнего электрического поля, поскольку при дозвуковой скорости плазменной струи влияние пульсаций плазмы на измельчение частиц отсутствует [12]. Таким образом, явление измельчения частиц при плазменном напылении с электроимпульсным воздействием можно объяснить зарядом частиц порошка в плазменном потоке и возникновением электростатических сил, входящих в резонанс с собственными колебаниями капли.

При измельчении частиц порошка функция распределения частиц по размерам смещается в сторону уменьшения их среднего диаметра. Связанное с измельчением уменьшение инерционности частиц обуславливает увеличение их средней скорости, а снижение среднеквадратического отклонения от среднего диаметра приводит к уменьшению разброса по скоростям [12]. Все это и обеспечивает равномерную упаковку частиц и снижение пористости (см. рис. 2). Авторы работ [10, 11] объясняют ускорение частиц при плазменном напылении с использованием дополнительного источника тока возникновением дополнительной скорости [11]

$$V_2 = \sqrt{\frac{2q \cdot \Delta\phi}{m}},$$

где q — заряд частички; $\Delta\phi$ — разница потенциалов между плазмотроном и напыляемой поверхностью; m — масса частички.

Таким образом, установлено, что использование электроимпульсного воздействия обеспечивает получение измельченной и более плотной микроструктуры плазменных покрытий за счет дополнительного дробления и ускорения частиц в плазменной струе.

Для определения эксплуатационных свойств покрытий проведены испытания на износостойкость и прочность сцепления с подложкой. Износостойкость плазменных покрытий определялась на машине трения СМЦ-2 по схеме ролик-колодка (рис. 4, a). Для смазки пары трения использовали моторное масло марки М10Г2К ГОСТ 8581-75. Скорость подачи масла составляла 30 капель в минуту, окружная скорость вращения ролика — 0,8 м/с, давление — 5 МПа.

Колодку и ролик изготавливали из углеродистой конструкционной качественной стали 45. Плазменное покрытие наносили на колодку, предварительно обезжиренную техническим этанолом и подвергнутую струйно-абразивной обработке. Ролики перед испытанием на износостойкость подвергались термическому улучшению. Закалка стальных роликов осуществлялась с температуры 840 °C и выдержке в течение 5 мин. Охлаждение — в воде. После закалки твердость роликов составила 54...55 HRC. Затем проводили высокотемпературный отпуск при температуре 550 °C, выдерживали в течение 1 ч и охлаждали на воздухе. Твердость роликов после высокотемпературного отпуска составила 30...32 HRC.

technology, there is also a slightly larger roller abrasion, which is associated with an increase in the hardness of the coating (Fig. 4, *b*). Fig. 5 shows the microstructures of the friction surface with the coating.

At the surface (Fig. 5, *a*), the friction tracks are seen uniformly distributed over the entire area. Dramatic differences in the pore scale can be explained by the fact that the spraying was carried out in air and the oxidation of elements is possible, and then under friction pitting is possible. The analysis of the friction surface (Fig. 5, *b*) showed that the block surface sprayed with the imposition of the electrical impulses is denser. The large number of small and medium-sized friction tracks of the small depth indicates that the friction processes proceeded smoothly.

The cohesive strength of plasma coatings with the substrate was determined by the “pin pulling” method

Анализ результатов определения износостойкости плазменных покрытий из порошка марки ПГ-19М-01 показал, что покрытие, полученное с наложением высоковольтных электрических импульсов напряжением 5 кВ, частотой 6,5 кГц, имеет в 1,5 раза меньший износ, чем покрытия, полученные по традиционной технологии, также наблюдается несколько больший износ ролика, что связано с повышением твердости покрытия (рис. 4, *б*). На рис. 5 представлены микроструктуры поверхности трения с покрытием.

На поверхности (рис. 5, *a*) видны дорожки трения, равномерно распределенные по всей площади. Резкие различия в масштабе пор можно объяснить тем, что напыление производилось на воздухе и возможно окисление элементов, а затем при трении — выкрашивание. Анализ поверхности трения (рис. 5, *б*)

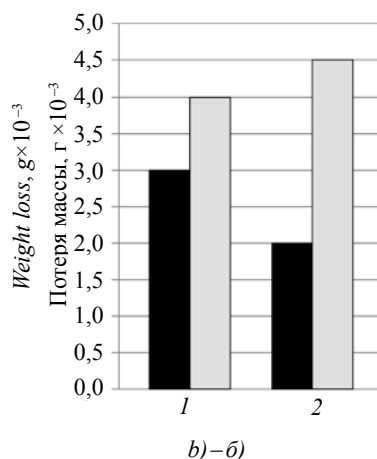
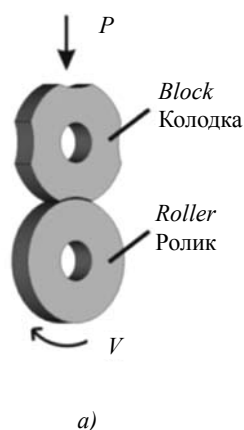


Fig. 4. Abrasive resistance of plasma coatings:

Рис. 4. Износостойкость плазменных покрытий:

a) — abrasion test / схема испытаний на износостойкость; *b)–б)* — results of the determination of abrasive resistance of plasma coatings of the ПГ-19М-01 powder / результаты определения износостойкости плазменных покрытий из порошка марки ПГ-19М-01

1 — the imposition of electrical impulses / без наложения электрических импульсов; 2 — with the imposition of high-voltage electrical impulses with the voltage of 5 kV, frequency of 6.5 kHz / с наложением высоковольтных электрических импульсов напряжением 5 кВ, частотой 6,5 кГц

■ — coating / покрытие; □ — roller / ролик

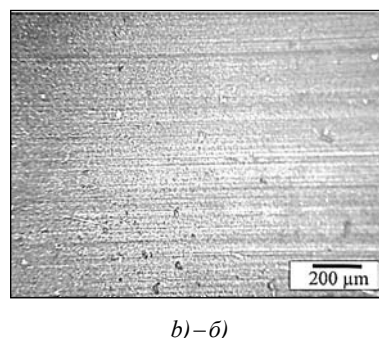
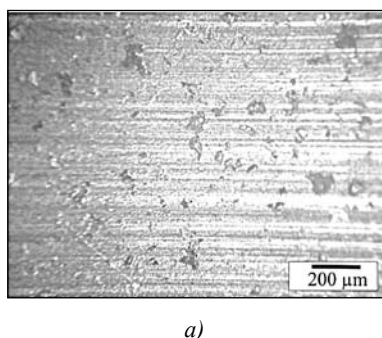


Fig. 5. Microstructure of friction surface of the block, sprayed by plasma method by the ПГ-19М-01 powder:

Рис. 5. Микроструктура поверхности трения колодки, напыленной плазменным методом порошком марки ПГ-19М-01:

a) — without the imposition of high-voltage electrical impulses / без наложения высоковольтных электрических импульсов; *b)–б)* — with the imposition of high-voltage electrical impulses with the voltage of 5 kV, frequency of 6.5 kHz / с наложением высоковольтных электрических импульсов напряжением 5 кВ, частотой 6,5 кГц

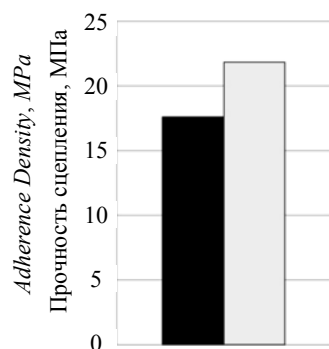


Fig. 6. Research of influence of electric impulse impact on the adhesion strength of plasma spraying of ПГ-19М-01 powder:

Рис. 6. Исследование влияния электроимпульсного воздействия на прочность сцепления плазменных покрытий из порошка марки ПГ-19М-01:

■ — *without the imposition of high-voltage electrical impulses / без наложения высоковольтных электрических импульсов;*
□ — *with the imposition of high-voltage electrical impulses with the frequency of 6.5 kHz, the voltage of 5 kV / с наложением высоковольтных электрических импульсов частотой 6,5 кГц, напряжением 5 кВ*

on the УММ-5 tensile testing machine. Samples to determine the bond strength was made of 45 carbon steel. Before coating spraying, the surface was defatted with technical ethanol and subjected to the abrasive-jet blasting. The sprayed coating thickness was 0.5...0.7 mm. The spraying was carried out at the mode mentioned above. To obtain the results of adhesion strength of coatings with the base spraying in one mode was performed on five samples. Fig. 6 shows the results of determination of the adhesion strength of coatings.

Thus, under the application of high-voltage electric impulses of with the amplitude of 5 kV, the frequency of 6.5 kHz, there is an increase of adhesion strength of bronze coating by 25% in combination with the abrasive resistance increased by 1.5 times.

Currently the equipment for plasma spraying of powder materials costs from 10 to 25 thousand dollars, depending on the scope of delivery. The cost of the power source for electric impulse impact is about 1 thousand dollars which amounts from 10 to 4% of the total cost of installation. Therewith, the effect of its use provides the obtaining of the coatings with increased mechanical properties on average by 20 ... 30%.

Thus, the prospects for the further development of research lie in a more detailed objectivation of the parameters of electric impulse impact and the mechanism of particle size reduction in the two-phase high-temperature flow.

CONCLUSIONS. 1. The imposition of the high-frequency impulses with the frequency of 6.5 kHz and the voltage of 5 kV on the direct circuit between the plasma torch and the product under plasma spraying allows getting the milled coating structure and enhances the hardness increase by 20...25%, the adhesion strength — by 25%, the adhesive resistance — by 1.5 times.

2. The electric impulse impact provides an increase in the average flight-in velocity of particles in the high-temperature two-phase flow under the plasma spraying by 25%.

показал, что поверхность колодки, напыленной с наложением электрических импульсов, более плотная. Большое количество мелких и средних дорожек трения небольшой глубины указывает на то, что процессы трения протекали равномерно.

Прочность сцепления плазменных покрытий с подложкой определяли методом «вытягивания штифта» на разрывной машине УММ-5. Образцы для определения прочности сцепления изготавливали из углеродистой стали 45. Перед нанесением покрытия поверхность обезжиривали техническим этанолом и подвергали струйно-абразивной обработке. Толщина нанесенного покрытия составляла 0,5...0,7 мм. Напыление проводилось на указанном выше режиме. Для получения результатов прочности сцепления покрытий с основанием напыление на одном режиме проводилось на пять образцов. На рис. 6 представлены результаты определения прочности сцепления покрытий.

Таким образом, при наложении высоковольтных электрических импульсов амплитудой 5 кВ, частотой 6,5 кГц наблюдается повышение прочности сцепления бронзового покрытия на 25% в сочетании с повышенной в 1,5 раза износостойкостью.

В настоящее время оборудование для плазменного нанесения порошковых материалов в зависимости от комплектности поставки стоит от 10 до 25 тыс. дол. Стоимость источника питания для электроимпульсного воздействия составляет около 1 тыс. дол., что составляет от 10 до 4% от общей стоимости установки. При этом эффект от его применения обеспечивает получение покрытий с повышенными в среднем на 20...30% механическими свойствами.

Таким образом, перспективы дальнейшего развития исследований заключаются в более детальном обосновании параметров электроимпульсного воздействия и механизма измельчения частиц в двухфазном высокотемпературном потоке.

ВЫВОДЫ. 1. Наложение высоковольтных импульсов частотой 6,5 кГц, напряжением 5 кВ по прямой схеме между плазмотроном и изделием при плазменном напылении позволяет получить измельченную структуру покрытия и обеспечивает повышение твердости на 20...25%, прочности сцепления — на 25%, износостойкости в 1,5 раза.

2. Электроимпульсное воздействие обеспечивает повышение средней подлетной скорости частиц в высокотемпературном двухфазном потоке при плазменном напылении на 25%.

Список литературы

- [1] Влияние электрических импульсов на структуру и твердость электродуговых покрытий [Текст] / А.Н. Дубовой, В.Н. Овсянников, А.А. Карпеченко, М.Н. Бобров, К.В. Овсянникова // 36. наук. праць НУК. — Миколаїв : НУК, 2012. — № 5–6 (445). — С. 38–41.
- [2] **Воронов, А.В.** Создание наноструктурных состояний в поверхностных слоях комбинированным методом ионной имплантации–магнетронного распыления–ультразвуковой обработкой [Текст] / А.В. Воронов // Физическая мезомеханика. — 2005. — № 8. — С. 113–116.
- [3] Газотермические покрытия из порошковых материалов [Текст] : справочник / Ю.С. Борисов, Ю.А. Харламов, С.Л. Сидоренко [и др.]. — К. : Наукова думка, 1987. — 544 с.
- [4] **Григорьев, А.И.** Капиллярные электростатические неустойчивости [Текст] / А.И. Григорьев // Соросовский образовательный журнал. — 2000. — Т. 6, вып. 6. — С. 37–43.
- [5] **Григорьев, А.И.** Электродиспергирование жидкости при реализации колебательной неустойчивости ее свободной поверхности [Текст] / А.И. Григорьев // Журнал технической физики. — 2000. — Т. 70, вып. 5. — С. 22–27.
- [6] **Гутман, Б.Е.** Измельчение капель при плазменном напылении с модуляцией тока [Текст] / Б.Е. Гутман // Автоматическая сварка. — 1988. — № 9 (420) — С. 37–39.
- [7] **Гутман, Б.Е.** О механизмах, влияющих на параметры плазменных покрытий в модулированной плазменной дуге [Текст] / Б.Е. Гутман // Сварочное производство. — 1986. — № 8 — С. 36–38.
- [8] **Кадырметов, А.М.** Исследование процессов плазменного нанесения и упрочнения покрытий и пути управления их качеством [Текст] / А.М. Кадырметов // Научный журнал КубГАУ. — 2012. — № 81. — С. 1–18.
- [9] **Калита, В.И.** Физика, химия и механика формирования покрытий, упрочненных наноразмерными фазами [Текст] / В.И. Калита // Физика и химия обработки материалов. — 2005. — № 4. — С. 46–57.
- [10] **Коротких, В.М.** Управляемые энергоэффективные технологии плазменного напыления защитных покрытий сельскохозяйственного назначения [Текст] / В.М. Коротких // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. — 2011. — № 8 (82) — С. 83–87.
- [11] **Пат. Ru 2007 Россия, МПК B05B7/22.** Установка плазменного напыления [Текст] / Галышкин Н.В., Коротких В.М. ; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова». — № 2335347 ; заявл. 09.01.2007.
- [12] **Петров, С.В.** Плазменное газозвдушеное напыление [Текст] / С.В. Петров, И.Н. Карп. — Л. : Машиностроение, 1986. — 253 с.
- [13] Плазменные покрытия с наноразмерным карбонитридом титана [Текст] / В.И. Калита, А.В. Самохин, Н.В. Алексеев [и др.] // Физика и химия обработки материалов. — 2007. — № 2. — С. 37–45.
- [14] Формирование плазменных покрытий с нано- и аморфной структурой [Текст] / Н.В. Куракова, В.В. Молоканов, В.И. Калита, Д.И. Комлев, П.П. Умпов // Физика и химия обработки материалов. — 2007. — № 4. — С. 36–39.
- [15] **Хасуй, А.** Наплавка и напыление [Текст] / А. Хасуй, О. Моригаки; пер. с япон. В.Н. Попова ; под ред. В.С. Степина, Н.Г. Шестеркина. — М. : Машиностроение, 1985. — 240 с.

© А.Н. Дубовой, А.А. Карпеченко, М.Н. Бобров, А.А. Новиков

Статью рекомендует в печать
д-р техн. наук, проф. В. Ф. Квасницкий



Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова
**НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ КОМПЛЕКС
«ИЗЛУЧИНА»**

Пассажирское судно на воздушной подушке амфибийного типа (СВПА) «Беркут» предназначено для перевозки людей по воде и льду в морских и речных районах при температуре наружного воздуха от –20°С до +45°С, с удалением от места убежища на расстояние до 50 миль, с заходом в крупные реки.

СВПА «Беркут» предназначено для эксплуатации в прибрежных мелководных и заболоченных районах, в заросшем мелководье, в обводненных во время разлива рек участках суши, во время ледохода и шуги, в тундре без ограничения прочности покрова, по снегу любой прочности, по рекам во время ледохода и ледостава.



Руководитель проекта:
д.т.н., профессор Зайцев В.В.
тел.: +38 (067) 515-75-53
e-mail: zvv1949@gmail.com

Научно-исследовательская часть НУК
Научно-производственный комплекс «Излучина»
e-mail: science@nuos.edu.ua
website: nuos.edu.ua/science; тел.: +38 (0512) 709-105