

# СТАНДАРТИЗАЦИЯ, СЕРТИФИКАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ

УДК 519.718.2

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-4-44-51>

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СВОЙСТВ ВАКУУМНЫХ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ УСТАНОВЛЕНИЯ СИСТЕМНЫХ СВЯЗЕЙ

Полякова М.А.<sup>1</sup>, Янсайтова М.И.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

<sup>2</sup>Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия

**Аннотация.** Постановка задачи (актуальность работы). В статье показано применение функционально-целевого анализа для системы «изделие – вакуумное ионно-плазменное покрытие». На примере технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия разработана последовательность установления системных связей в системе «изделие – вакуумное ионно-плазменное покрытие». Проведен анализ функций каждой подсистемы и установлены связи между ними. Целью работы является разработка методики выбора показателей качества вакуумных ионно-плазменных покрытий на основе определения системных связей. **Используемые методы.** Системные связи в системе «изделие – вакуумное ионно-плазменное покрытие» определены с использованием функционально-целевого анализа. Это позволило произвести декомпозицию данной технической системы и определить связь между функциями и свойствами для каждой подсистемы. **Новизна** проведенного исследования заключается в анализе процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия как сложной технологической системы, что позволяет установить существующие связи между свойствами покрытия, которые формируются в процессе его нанесения, и требуемыми функциональными характеристиками изделия с покрытием. **Результат.** Полученные результаты теоретического исследования являются развитием работ в области стандартизации свойств покрытий с использованием функциональных связей на различных уровнях технической системы «изделие – покрытие». **Практическая значимость.** Предложенная методика позволяет установить системные связи между функциями изделия с покрытием и его свойствами, что решает задачу выбора перечня свойств для нормирования в нормативной, конструкторской и технической документации.

**Ключевые слова:** вакуумное ионно-плазменное покрытие, система «изделие – покрытие», свойство, функционально-целевой анализ, нормирование, нормативная документация.

### Введение

Одним из направлений обеспечения эксплуатационных свойств поверхностного слоя является нанесение покрытий. Анализ требований действующих стандартов показал, что в настоящее время действующие стандарты распространяются на покрытия, наносимые электрохимическим, химическим и горячим способами. Отсутствуют стандарты, регламентирующие требования к показателям качества вакуумных ионно-плазменных покрытий [1–5]. Кроме того, в действующих стандартах регламентируются свойства, обусловленные только технологией нанесения. При этом не учитываются свойства,

обусловленные функциями изделия, что в значительной степени ограничивает возможности конструктора назначать вид покрытия, состав, его физико-химические свойства в зависимости от условий эксплуатации изделий. Это связано со сложностью нормирования показателей качества для включения в нормативную и конструкторско-технологическую документацию, поэтому необходимо использовать принципиально новые подходы для нормирования показателей качества вакуумных ионно-плазменных покрытий.

Под вакуумной ионно-плазменной технологией понимается совокупность методов обработки с использованием трех необходимых условий: наличие вакуума, наличие вещества в плазменном состоянии, ускорение плазменных потоков и

пучков заряженных частиц с помощью электрических и магнитных полей. Вакуумные ионно-плазменные технологии рассматриваются в настоящее время как наиболее перспективные технологии для придания специальных свойств поверхности изделий авиационной техники. Они позволяют создавать сложные композиции различных видов покрытий, а также осуществлять комплексную обработку с предварительным диффузионным модифицированием [1–3, 5].

По своей сущности покрытие не может существовать отдельно от подложки (или изделия), на которое оно наносится. Как известно, свойства покрытий, а значит, их свойства зависят не только от материала и технологических режимов нанесения, но и от свойств материала, из которого изготовлено изделие. С этой точки зрения при выборе свойства покрытия, которые следует нормировать в нормативной и технической документации, возникает необходимость рассматривать систему «изделие – вакуумное ионно-плазменное покрытие».

### Методы исследования

Для установления функциональных связей в системе «покрытие – изделие» в данной работе предлагается использовать функционально-целевой анализ (ФЦА), разработанный учеными Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова [6–11]. Функционально-целевой подход позволяет комбинировать технические решения для обеспечения отдельной функции и определять их согласованность с другими уже существующими функциями. Применение ФЦА заключается в дезинтеграции комплексного качества изделия на измеримые составляющие, называемые единичными показателями. В зависимости от целей использования можно выделить потребительские функции, которые должно выполнять изделие, и поставить в соответствие им показатели качества, регламентируемые в стандартах [12–14].

Рассмотрим особенности применения ФЦА для системы «изделие – вакуумное ионно-плазменное покрытие». Анализируемую систему можно разделить на ряд подсистем, для каждой из которых провести функционально-целевой анализ. Это позволит определить функции каждой подсистемы, установить связи между ними, что в конечном итоге позволит выбрать и научно обосновать показатели качества вакуумного

ионно-плазменного покрытия, которые необходимо нормировать в нормативной и конструкторско-технологической документации.

В этой связи методика выбора показателей качества вакуумных ионно-плазменных покрытий (рис. 1) состоит из следующих этапов:

1) функционально-целевой анализ системы «изделие – вакуумное ионно-плазменное покрытие»;

2) функционально-целевой анализ элемента «вакуумное ионно-плазменное покрытие» системы «изделие – вакуумное ионно-плазменное покрытие»;

3) определение функций технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия.

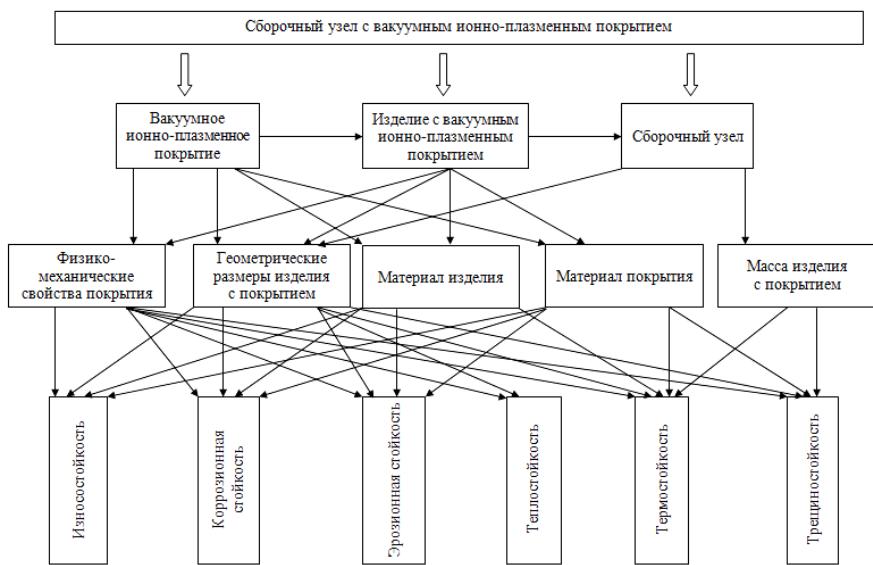
Для выявления функций изделия с покрытием, покрытий, технологического процесса нанесения покрытий необходимо рассмотреть отдельно каждый элемент данной системы.

### Результаты исследования и их обсуждение

Поскольку покрытие наносится на определенное изделие, которое в свою очередь является составной частью узла или механизма, поэтому ФЦА системы «изделие – вакуумное ионно-плазменное покрытие» позволяет установить связи между функциональными свойствами покрытия с учетом требуемых свойств изделия. Характеристиками данной системы являются физико-механические свойства покрытий, геометрические характеристики самого изделия, материалы изделия и покрытия, а также масса изделия с покрытием.

В свою очередь, функциями в данной системе, то есть зависимыми от вышеупомянутых характеристик параметрами, являются эксплуатационные характеристики. Условия эксплуатации изделий определяются напряженным состоянием, скоростью скольжения сопряженных поверхностей изделий, температурой нагрева, газовой средой, наработкой и другими факторами [1, 3, 5]. Поэтому для изделий с вакуумным ионно-плазменным покрытием износостойкость, коррозионная стойкость, эрозионная стойкость, теплостойкость, термостойкость и трещиностойкость являются наиболее важными.

Схема функционально-целевого анализа системы «изделие – вакуумное ионно-плазменное покрытие» (рис. 2) заключается в установлении связей между функциями изделия с покрытием и свойствами покрытия.



Таким образом, физико-механические и геометрические характеристики оказывают влияние на все рассматриваемые эксплуатационные характеристики (функции изделия) в системе «изделие – вакуумное ионно-плазменное покрытие». Износостойкость, коррозионная и эрозионная стойкость зависят как от материала изделия, так и материала покрытия. Более того, материал покрытия определяет степень термостойкости, трещиностойкости. С другой стороны, эти свойства также зависят от массы изделия с покрытием.

Следующим этапом является проведение ФЦА для самого покрытия, что позволило определить его свойства как элемента системы «изделие – вакуумное ионно-плазменное покрытие» (рис. 3).

Выходными показателями технологического процесса нанесения покрытий вакуумным ионно-плазменным напылением, характеризующими только покрытие в системе «изделие – вакуумное ионно-плазменное покрытие», являются толщина, адгезия, микротвердость, шероховатость, пористость покрытия. Технологический процесс нанесения вакуумных ионно-плазменных покрытий представляет собой ряд последовательно выполняемых основных, вспомогательных и обслуживающих операций. Основными операциями технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия являются предварительная подготовка поверхности изделия перед нанесением покрытия, ионная очистка, предварительный нагрев поверхности изделия потоком ионов катода, которые сопровождаются следующими этапами формирования покрытия: создание потока напыляемых частиц, взаимодействие плазмы и рабочего газа с поверхностью изделия, осаждение ионов на поверхности изделия и охлаждение изделия. К вспомогательным операциям техноло-

гического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия относится контроль параметров поверхности изделия перед нанесением покрытия и свойств покрытий после осаждения вакуумного ионно-плазменного покрытия. Данные виды контроля осуществляются в соответствии с конструкторско-технологической документацией. К обслуживающей операции технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия относится техническое обслуживание оборудования, на котором непосредственно осуществляется нанесение вакуумного ионно-плазменного покрытия.

Поскольку формирование вакуумного ионно-плазменного покрытия представляет собой ряд последовательно протекающих процессов, рассмотрим функциональные связи между технологическими параметрами процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия, этапами его формирования и свойствами покрытия (рис. 4).

Чтобы обеспечить выполнение эксплуатационных свойств деталей газотурбинного двигателя (ГТД), на которые наносится покрытие TiN вакуумным ионно-плазменным напылением, необходимо правильно выбрать свойства этого покрытия для регламентации в нормативной, технической и конструкторской документации. Для этого устанавливают функции изделия с покрытием. В работах [15–17] показана перспективность нанесения TiN на компрессорные лопатки ГТД для продления срока их службы.

Рассмотрим особенности применения ФЦА для установления существующих системных и функциональных связей в системе «изделие – вакуумное ионно-плазменное покрытие». На рис. 5 представлена обобщенная схема взаимосвязи функциональных свойств вакуумного ионно-плазменного покрытия с процессами его получения.

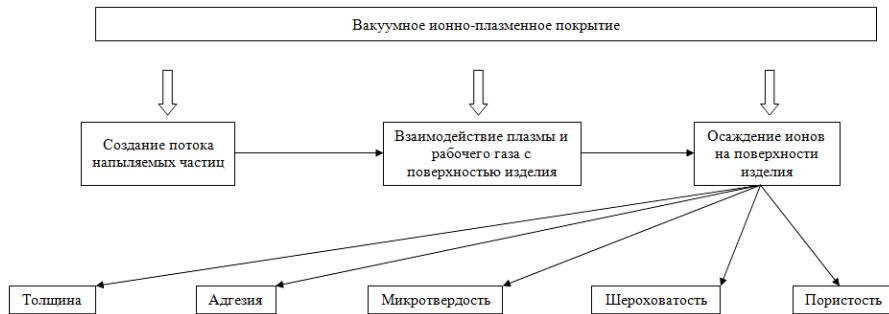


Рис. 3. Взаимосвязь этапов формирования вакуумного ионно-плазменного покрытия и его свойствами в системе «вакуумное ионно-плазменное покрытие»



Рис. 4. Структурно-функциональная схема технологического процесса нанесения вакуумных ионно-плазменных покрытий

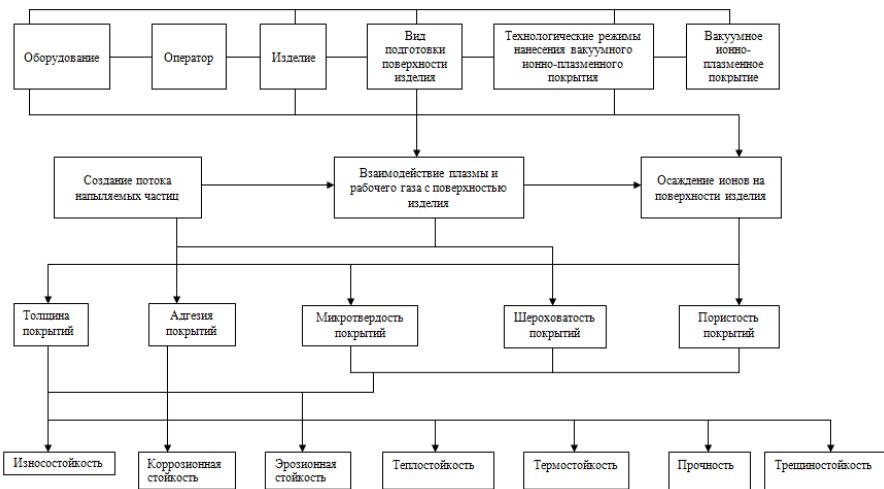


Рис. 5. Взаимосвязь эксплуатационных свойств вакуумного ионно-плазменного покрытия с процессами его формирования

### Заключение

Таким образом, использование функционально-целевого анализа дает возможность установить системные связи между функциями изделия с покрытием и его свойствами в сложной технологической системе. Разработанная методика выбора свойств вакуумных ионно-плазменных покрытий позволяет установить взаимосвязь между требованиями к функциональным свойствам этого покрытия и техническими возможностями процесса формирования покрытия данным методом. Использование разработанного подхода даст возможность решить задачу выбора перечня свойств покрытия для нормирования в нормативной, конструкторской и технической документации.

### Список литературы

- Будилов В.В., Мухин В.С., Ягафаров И.И. Технологическая наследственность, качество поверхности, точность и эксплуатационные свойства деталей с покрытиями из плазмы вакуумного дугового разряда: монография. М.: Машиностроение, 2015. 269 с.
- Сысоев Ю.А. Обеспечение качества вакуумно-дуговых ионно-плазменных покрытий // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. 2014. №63. С. 84–90.
- Киреев Р.М., Ягафаров И.И. Обеспечение точности деталей при ионно-плазменном нанесении покрытий // Вестник УГАТУ. 2012. №1(46). Т.16. С. 88–93.
- Фатхутдинов Р.А. «Функции-процессы» в управлении конкурентоспособностью // Стандарты и качество. 2008. №2. С. 74–78.
- Мухин В.С., Шехтман С.Р. Поверхность технического объекта: физика, химия, механика, нанотехнология модификации // Вестник УГАТУ. 2007. №1 (19). Т.9. С. 84–91.
- Рубин Г.Ш., Полякова М.А. Развитие научных основ стандартизации // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 1. С. 97–101.
- Рубин Г.Ш., Гун Г.С., Полякова М.А. Стандартизация метизной продукции: особенности, проблемы, перспективы развития // Известия ТулГУ. Технические науки. 2014. Вып. 10. Ч. 2. С. 27–34.
- Рубин Г.Ш. Квалиметрия метизного производства. Магнитогорск: ФГБОУ ВПО «МГТУ», 2012. 167 с.
- Данилова Ю.В., Полякова М.А., Рубин Г.Ш. Поиск консенсуса между потребителем и производителем – важный этап при разработке нормативных документов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. № 2. С. 79–84.
- Рубин Г.Ш. Функционально-целевой анализ качества изделий // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2011. №2. С. 29–30.
- Функционально-целевой анализ как метод структурирования свойств и функций металлоизделий / Рубин Г.Ш., Чукин М.В., Гун Г.С., Полякова М.А. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2016. Т. 59. №10. С. 715–719.
- Рубин Г.Ш., Данилова Ю.В., Полякова М.А. Функционально-целевой анализ как метод структурирования функций и свойств металлоизделий. Сообщение 1 // Производство проката. 2015. № 5. С. 27–31.
- Рубин Г.Ш., Данилова Ю.В., Полякова М.А. Функционально-целевой анализ как метод структурирования функций и свойств металлоизделий. Сообщение 2 // Производство проката. 2015. № 6. С. 38–43.
- Камалутдинов И.М. Совершенствование конструкции и технологии производства геофизического кабеля на основе функционально-целевого анализа качества продукции: дис ... канд. техн. наук // Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова. Магнитогорск, 2010. 143 с.
- Мубайджян С.А., Александров Д.А., Горлов Д.С. Нанослойные упрочняющие покрытия для защиты стальных и титановых лопаток компрессора ГТД // Авиационные материалы и технологии. 2011. С. 3–8.
- Повышение коррозионной стойкости стальных лопаток компрессора ГТД путем применения ионно-плазменного покрытия / В.Я. Белоус, А.Д. Жирнов, А.Н. Луценко, С.А. Мубайджян // Авиационные материалы и технологии. 2006. С. 53–60.
- Технологические особенности формирования полифункциональных наноструктурированных покрытий нитрида титана для компрессорных лопаток авиационных ГТД / Ю.П. Тарасенко, И.Н. Царева, Е.П. Кочеров, Л.М. Вязовская // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2012. №3(34). С. 296–302.

Поступила 25.11.19  
Принята в печать 09.12.19

## METHOD FOR DETERMINING THE PROPERTIES OF VACUUM ION-PLASMA COATINGS BY ESTABLISHING SYSTEM RELATIONSHIPS

Marina A. Polyakova – DrSc (Eng.), Associate Professor, Professor

of the Department of Materials Processing Technologies

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

E-mail: m.polyakova@magtu.ru. ORCID 0000-0002-1597-8867

Milyausha I. Yansaitova – Post-Graduate Student

Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia. E-mail: milyausha.yansaitova@mail.ru

**Abstract. Problem Statement (Relevance):** The paper shows the application of a functional-target analysis for the system “item – vacuum ion-plasma coating”. Using the vacuum ion-plasma coating technological process as an example, the authors developed a scheme for establishing system relationships in the system “item – vacuum ion-plasma coating”. The functions of every subsystem were analyzed and the relationships between them were established. **Objectives:** To develop the method for selecting quality properties of vacuum ion-plasma coatings by establishing the system relationships. **Methods Applied:** The system relationships in the system “item – vacuum ion-plasma coating” were determined using the functional-target analysis. It made it possible to make a decomposition of the whole technical system and to establish the relationships between the functions and the properties for every subsystem. **Novelty:** The novelty of the study lies in the analysis of a vacuum ion-plasma coating process as a complicated technological system, which allows us to establish the existing relationships between the coating properties formed during the technological process and the required functional characteristics of the coated item. **Findings:** The obtained results of this theoretical study are considered to follow the studies in the standardization of coating properties using functional relationships at different stages of the technical system “item – vacuum ion-plasma coating”. **Practical Relevance:** The proposed method allows us to establish system relationships between the functions of the coated item and its properties solving the problem of selecting a list of properties for their regulation in normative, design and technical documentation.

**Keywords:** vacuum ion-plasma coating, system “item – vacuum ion-plasma coating”, property, functional-target analysis, regulation, normative documentation.

### References

1. Budilov V.V., Mukhin V.S., Yagafarov I.I. *Tekhnologicheskaya nasledstvennost, kachestvo poverkhnosti, tochnost i eksploatatsionnye svoystva detaley s pokrytiyami iz plazmy vakuumnogo dudgovogo razryada: monografiya* [Technological heredity, surface quality, accuracy and operational properties of parts with vacuum arc plasma coatings: monograph]. Moscow: Mechanical Engineering, 2015, 269 p. (In Russ.)
2. Sysoev Yu.A. Quality assurance of vacuum-arc ion-plasma coatings. *Otkrytie informatsionnye i kompyuternye integrirovannyye tekhnologii* [Open information and computer integrated technologies], 2014, no. 63, pp. 84–90. (In Russ.)
3. Kireev R.M., Yagafarov I.I. Ensuring the accuracy of items when applying ion-plasma coatings. *Vestnik UGATU* [Vestnik of USATU], 2012, no. 1 (46), pp. 88–93. (In Russ.)
4. Fatkhutdinov R.A. “Functions-processes” in the competitiveness management. *Standarty i kachestvo* [Standards and quality], 2008, no. 2, pp. 74–78. (In Russ.)
5. Mukhin V.S., Shekhtman S.R. The technical object surface: physics, chemistry, mechanics, nanotechnology of modification. *Vestnik UGATU* [Vestnik of USATU], 2007, no. 1 (19), vol. 9, pp. 84–91. (In Russ.)
6. Rubin G.Sh., Polyakova M.A. Development of standardization scientific basics. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2014, no. 1, pp. 97–101. (In Russ.)
7. Rubin G.Sh., Gun G.S., Polyakova M.A. Standardization of metalware: features, problems, prospects of development. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of TulSU. Technical sciences], 2014, no. 10, part 2, pp. 27–34. (In Russ.)
8. Rubin G.Sh. *Kvalimetrya metallnogo proizvodstva* [Qualimetry of metalware production]. Magnitogorsk: FSBEI HPE NMSTU, 2012. 167 p. (In Russ.)
9. Danilova Yu.V., Polyakova M.A., Rubin G.Sh. The search for consensus between customers and manufacturers as an important stage in the development of regulatory documents. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2015, no. 2, pp. 79–84. (In Russ.)
10. Rubin G.Sh. Functional-target analysis of products quality. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2011, no. 2, pp. 29–30. (In Russ.)
11. Rubin G.Sh., Chukin M.V., Gun G.S., Polyakova M.A. Functional-target analysis as a method for structuring the metalware properties and functions. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Chernaya metallicheskaya* [Izvestiya. Ferrous Metallurgy], 2016, vol. 59, no. 10, pp. 715–719. (In Russ.)
12. Rubin G.Sh., Danilova Yu.V., Polyakova M.A. Functional-target analysis as a method for structuring metalware functions and properties. Report 1. *Proizvodstvo prokata* [Production of rolled products], 2015, no. 5, pp. 27–31. (In Russ.)
13. Rubin G.Sh., Danilova Yu.V., Polyakova M.A. Functional-target analysis as a method for structuring metalware functions and properties. Report 2. *Proizvodstvo prokata* [Production of rolled products], 2015, no. 6, pp. 38–43. (In Russ.)
14. Kamalutdinov I.M. *Sovershenstvovanie konstruktsii i tekhnologii proizvodstva geofizicheskogo kabelya na osnove funktsionalno-tselevogo analiza kachestva produktov*. Diss.

- kand. tekhn. nauk* [Improving the design and production technology of geophysical cables applying a functional-target analysis of the product quality. PhD thesis]. Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2010, 143 p.
15. Muboyadzhyan S.A., Aleksandrov D.A., Gorlov D.S. Nanolayer hardening coatings for the protection of steel and titanium blades of gas turbine engine compressors. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation materials and technologies], 2011, pp. 3–8. (In Russ.)
16. Belous V.Ya., Zhirmov A.D., Lutsenko A.N., Muboyadzhyan S.A. Increasing the corrosion resistance of gas turbine engine compressor steel blades by applying an ion-plasma coating. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation materials and technologies], 2006, pp. 53–60. (In Russ.)
17. Tarasenko Yu. P., Tsareva I.N., Kocherov E.P., Vyazovskaya L.M. Technological features of the formation of polyfunctional nanostructured titanium nitride coatings for aircraft gas turbine engine compressor blades. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta* [Vestnik of Samara State Aerospace University], 2012, no. 3 (34), pp. 296–302. (In Russ.)

Received 25/11/19

Accepted 09/12/19

**Образец для цитирования**

Полякова М.А., Янсайтова М.И. Методика определения свойств вакуумных ионно-плазменных покрытий на основе установления системных связей // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т.17. №4. С. 44–51. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-4-44-51>

**For citation**

Polyakova M.A., Yansaitova M.I. Method for Determining the Properties of Vacuum Ion-Plasma Coatings by Establishing System Relationships. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2019, vol. 17, no. 4, pp. 44–51. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-4-44-51>