

Технологические особенности реализации детонационных функционально-ориентированных покрытий в машиностроении

Выполнен анализ особенностей формирования детонационных функционально-ориентированных покрытий. Показано, что их свойства должны обеспечиваться в зависимости от особенностей действия эксплуатационных функций. Приведена принципиальная схема установки для напыления покрытий. Установлены основные характеристики и технологические особенности реализации функционально-ориентированных покрытий в машиностроении.

Ключевые слова: детонация; функциональная ориентация; покрытия; технологическое обеспечение; эксплуатация.

A.N. Mikhailov, D.Eng., M.G. Petrov, Post graduate student,
E.A. Sheiko, Can.Eng., D.A. Mikhailov, Post graduate student
(Donetsk National Technical University)

Technological peculiarities in realization of detonation functionally-oriented coatings in mechanical engineering

The paper reports the analysis carried out regarding the peculiarities in the formation of explosion functionally-oriented coatings. It is shown that their properties should be ensured depending on the action peculiarities of operation functions. A schematic diagram of a plant for coating sputtering is shown. Basic characteristics and technological peculiarities for the realization of functionally-oriented coatings in mechanical engineering are established.

Keywords: detonation; functional orientation; coatings; technological support; operation.

В настоящее время для повышения работоспособности деталей машин и обеспечения их нетрадиционных свойств используются детонационные покрытия [1 – 4]. Детонационные покрытия деталей машин позволяют существенно повысить их износостойкость, эрозионную и коррозионную стойкость, обеспечить минимальную пористость покрытий и газопроницаемость, снизить температурные воздействия на основной материал детали.

Особенно эффективно использование детонационных покрытий для деталей, работающих в сложных эксплуатационных условиях, а именно при совместном действии температурных, эрозионно-коррозионных и других воздействий при наличии абразивных, пылевых, щелочных, кислотных и солевых сред.

На основе детонационного метода обеспечивается возможность напыления покрытий из различных материалов, в том числе, черных и цветных металлов и их сплавов, нержавеющей, комплексно-легированных и быстрорежущих сталей, различных твердых сплавов и

керамики, композиционных и композитных материалов или их комбинаций.

Можно отметить, что детонационный метод обеспечивает возможность напыления покрытий, как с минимальной пористостью, так и с заданной пористостью покрытия. Например, покрытия с заданной пористостью обеспечивают значительное снижение влияния температуры на основной материал детали или улучшают смазывающий эффект. Так, специальное пористое покрытие, толщиной всего несколько микрометров, значительно снижает температурные воздействия на основной материал турбины газотурбинного авиационного двигателя (каждый микрометр покрытия поверхности позволяет снизить температуру на основном материале в пределах 1...15 °С).

Это позволяет создавать газотурбинные двигатели следующих поколений, работающие при высоких температурных воздействиях на турбину авиационного двигателя. А также детонационные методы напыления покрытий обеспечивают при формировании по-

крытия условия горячего прессования порошкового материала на поверхности детали, высокую адгезию покрытия к основному материалу детали и в целом создают специальные нетрадиционные свойства деталей машин.

Следует заметить, что при эксплуатации машин, на ряд деталей действуют неравномерные эксплуатационные функции, а именно: неравномерные удельные контактные нагрузки, неравномерные коррозионные воздействия, неравномерные температурные и другие виды воздействий. Эти воздействия вызывают неравномерные разрушения деталей и их элементов: неравномерный износ каждого поверхностного слоя и поверхностных слоев относительно друг друга; коррозионно-эрозионные разрушения каждого поверхностного слоя и поверхностных слоев относительно друг друга; температурные разрушения деталей в целом и их элементов; другие виды разрушений деталей [5]. Это снижает эксплуатационный потенциал деталей.

В таких условиях эксплуатации целесообразно использование специальных покрытий, которые бы позволяли решать вопросы полного использования деталей при неравномерных действиях эксплуатационных функций. В качестве таких покрытий рационально использование функционально-ориентированных покрытий [6]. При этом детонационный метод нанесения функционально-ориентированных покрытий деталей машин является перспективным направлением развития отделочно-упрочняющих методов по повышению их свойств.

Целью данной работы является повышение эксплуатационных свойств деталей машин, работающих в сложных условиях, при действии переменных эксплуатационных функций на основе применения детонационных функционально-ориентированных покрытий.

В соответствии с поставленной целью определены следующие задачи работы: исследовать особенности реализации детонационных функционально-ориентированных покрытий; выполнить анализ основных характеристик детонационных функционально-ориентированных покрытий; разработать технологическое обеспечение для формирования детонационных функционально-ориентированных покрытий.

1. Особенности синтеза детонационных функционально-ориентированных покрытий. Можно отметить, что при эксплуатации детали на ее поверхности действует множество эксплуатационных функций, на каждую

поверхность воздействуют неравномерные нагрузки, каждая зона действия удельных нагрузок имеет определенные топологические параметры, при этом действующие функции имеют определенную структуру.

Поэтому в процессе эксплуатации детали происходят местные разрушения деталей в зонах максимального действия нагрузок, эрозии, коррозии или температур, при отсутствии разрушений в других зонах детали. К подобным деталям, имеющим зоны неравномерного разрушения, можно отнести лопатки компрессора газотурбинного двигателя (перо лопатки), режущие кромки сверл и пазовых фрез, поверхности шарниров различных механизмов, рабочие поверхности зубьев колес и другие детали. В этих деталях происходят неравномерные разрушения элементов и поверхностей.

Для повышения эксплуатационного потенциала деталей в условиях действия неравномерных функций необходимо применение функционально-ориентированных покрытий [5, 6], формируемых детонационным методом. Эти покрытия позволяют решать целый комплекс эксплуатационных проблем, а именно: повышают эксплуатационные свойства детали; обеспечивают заданный, требуемый или предельный эксплуатационный потенциал детали; адаптируют деталь при изготовлении к особенностям ее эксплуатации; повышают ремонтопригодность детали за счет обеспечения ее многократного восстановления (например, на основе принципа единовременного разрушения покрытий на поверхностях и/или функциональных элементах без разрушения основы с повторными многократными напылениями покрытий).

Процесс реализации детонационных функционально-ориентированных покрытий необходимо рассматривать следующим образом. Для обеспечения функционально-ориентированных свойств деталей необходимо определить соответствия между эксплуатационными функциями F , технологическими воздействиями TB (реализации покрытий) и свойствами C изделия (рис. 1). Процесс напыления покрытий должен базироваться на том, что между эксплуатационными функциями F , технологическими воздействиями TB и свойствами C изделия действуют определенные связи [5, 6], а именно: подобия, соответствия, идентичности, аналогии, эквивалентности и адекватности.

На рис. 1. представлена модель взаимосвязей φ_i^j объектов системы: эксплуатационные

функции F , технологические воздействия TB и свойства C детали. На базе этих связей реализуются функционально-ориентированные свойства [6]. Здесь можно отметить, что структура связей между элементами модели имеет замкнутую форму, которая позволяет определять параметры технологических воздействий и свойств детали в зависимости от особенностей действия эксплуатационных функций на элементы детали. Петли модели φ_i^i обозначают внутренние процессы в i -м объекте системы.

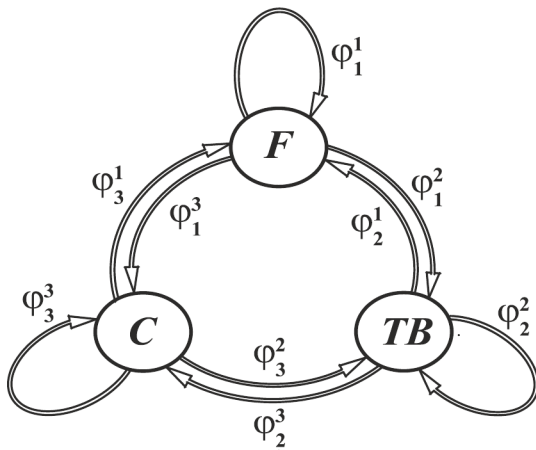


Рис. 1. Модель взаимосвязей φ_i^j объектов системы: эксплуатационные функции F , технологические воздействия TB и свойства C покрытия

Эти параметры определяются на базе группы особых принципов ориентации свойств и технологических воздействий (покрытий) [5]:

1. Функционального соответствия особенностей действия эксплуатационных функций, характеристик реализации технологических воздействий и параметров обеспечения необходимых свойств.

2. Топологического соответствия геометрических параметров функционального элемента детали, в котором действует элементарная функция при эксплуатации, геометрическим параметрам зоны реализации технологических воздействий на деталь и геометрических параметров зонного обеспечения необходимых свойств.

3. Количественного соответствия множества функциональных элементов, в которых действует множество различных элементарных функций при эксплуатации, множеству реализации технологических воздействий и множеству элементов обеспечения необходимых свойств в функциональных элементах детали.

4. Адекватной зависимости пространственных особенностей действия элементарной функции при эксплуатации, технологических воздействий и эксплуатационных свойств в пространстве каждого функционального элемента детали.

5. Адекватной зависимости временных особенностей действия элементарной функции при эксплуатации, временных или пространственных особенностей реализации технологических воздействий и временных эксплуатационных свойств в каждом функциональном элементе детали.

6. Структурного соответствия действия элементарных функций, реализации технологических воздействий и выполнения свойств в функциональных элементах детали из условия обеспечения заданных, требуемых или предельных свойств всей детали.

7. Адекватного структурно-функционального соответствия свойств в пространстве и во времени каждого функционального элемента заданному или предельному потенциалу общих свойств всей детали в целом.

8. Адекватного структурно-функционального соответствия свойств в окрестностях каждого функционального элемента в пространстве и во времени заданному, требуемому или предельному потенциалу общих свойств всей детали в целом.

Функционально-ориентированные покрытия формируются на базе этой группы особых принципов ориентации технологических воздействий и свойств деталей в зависимости от особенности их эксплуатации в машине.

Для реализации детонационных функционально-ориентированных покрытий необходима специальная детонационная установка, способная обеспечивать реализацию приведенных выше принципов. На рис. 2 приведена принципиальная схема установки для напыления функционально-ориентированных покрытий: 1 – верхняя часть детонационного ствола; 2 – нижняя часть детонационного ствола; 3 – рамное основание; 4 – блок подачи газов; 5 – воспламенитель (свеча); 6 – блок воспламенителя; 7 – питатели для порошковых материалов; 8 – управляемые дозаторы напыляемого порошкового материала; 9 – подложка (напыляемая деталь); 10 – стол (манипулятор) для закрепления подложки; Π_1, Π_2, Π_3 – возвратно-поступательное движение относительно оси x, y, z , соответственно; l_0 – расстояние от среза ствола до напыляемой поверхности детали. Стрелками показано поступление га-

зов: N_2 – азот, C_2H_2 – горючий газ (ацетилен), O_2 – кислород, CO_2 – углекислый газ.

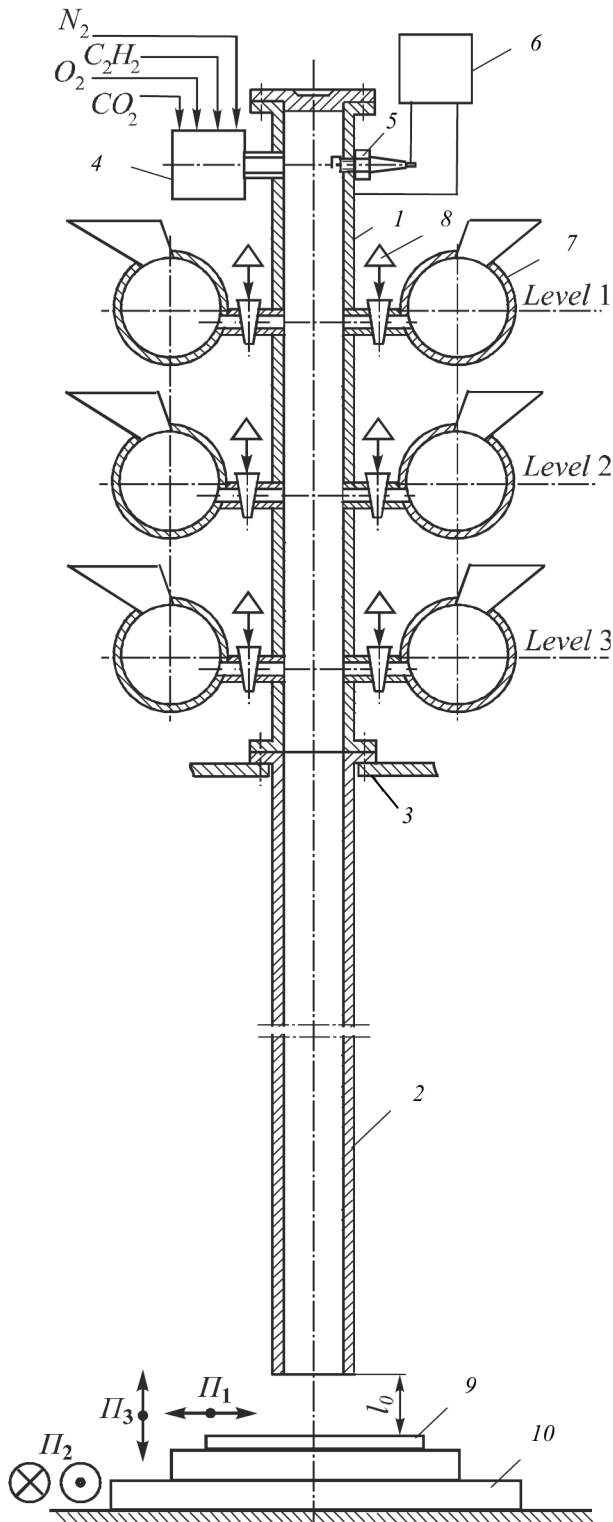


Рис. 2. Принципиальная схема установки для напыления детонационных функционально-ориентированных покрытий

Основной особенностью этой установки (см. рис. 2) является наличие нескольких питателей и управляемых дозаторов, располагающихся на нескольких уровнях верхней

части детонационного ствола. С помощью их обеспечивается следующее: возможность последовательной подачи в ствол установки различных порошковых материалов и напыления их в заданных зонах детали; возможность параллельной подачи различных порошковых материалов и управления их составом; способность к изменению пропорции порошковых материалов при напылении; возможность формировать комбинации приведенных методов.

С помощью этих особенностей выполняется реализация детонационных функционально-ориентированных покрытий. Наличие манипулятора на установке позволяет реализовать заданную кинематику движения детали относительно потока напыляемого материала покрытия.

2. Основные характеристики детонационных функционально-ориентированных покрытий. На рис. 3 приведены основные характеристики детонационных функционально-ориентированных покрытий. К ним можно отнести следующие: количество слоев покрытий; топография покрытий; толщина каждого слоя; пространственная структура поверхностей детали; особенности физико-механических свойств покрытий; особенности состава материалов и текстуры покрытия; назначение покрытий.

По количеству слоев детонационные функционально-ориентированные покрытия могут формироваться однослойными и многослойными. Многослойные покрытия могут реализовываться как для выполнения функционального назначения, так и для комплексного решения вопросов функционального назначения и выполнения связей между подложкой и слоями покрытий. При этом по топографии эти покрытия могут подразделяться на зональные, пятнистые, со специальной функциональной формой и другие варианты. По толщине каждого слоя данные покрытия могут формироваться постоянной или переменной толщиной, а также образовываться ступенчато в соответствии с особенностями действия эксплуатационных функций.

Можно отметить, что каждая деталь обычно имеет множество различных поверхностей, которые структурированы по детали. При этом на эти поверхности может действовать множество различных эксплуатационных функций, которые также структурируются в общую функцию. Для обеспечения заданных эксплуатационных свойств детали необходимо также структурировать покрытия по их по



Рис. 3. Основные характеристики функционально-ориентированных покрытий

верхностям. Поэтому здесь, функционально-ориентированные покрытия формируются по пространственной структуре детали и подразделяются следующим образом: по количеству покрытий в структуре детали, по составу покрытий, связям между элементами структуры, по вариантам структуры покрытий на поверхностях детали.

Главными особенностями детонационных функционально-ориентированных покрытий является то, что параметры физико-механических свойств и состав материалов может быть: не изменяющийся; изменяющийся по времени; изменяющийся в пространстве; комбинированные (не изменяющиеся и изменяющиеся); функционально-, топологически-, структурно-зависимые от особенностей их эксплуатации в машине.

По назначению функционально-ориентированные покрытия подразделяются на покрытия:

- для обеспечения предельного эксплуатационного потенциала детали;
- для адаптации детали при изготовлении к особенностям эксплуатации ее в машине;
- для обеспечения одновременного полного износа покрытий по всей детали при действии неравномерных эксплуатационных функций (повышение ремонтпригодности детали и числа ее восстановлений);

3. Технологические особенности реализации детонационных функционально-ориентированных покрытий. Технологические особенности реализации детонационных функционально-ориентированных покрытий приведены на рис. 4. Эти особенности можно структурировать следующим образом: основные этапы технологического процесса; технологическое обеспечение; параметры процессов; особенности применяемых сред и газов; структура и параметры порошковых материалов; технологические особенности напыления

покрытий.

Можно отметить, что технологические процессы по реализации детонационных функционально-ориентированных покрытий обычно формируются на трех этапах: 1-й этап – подготовка детали к нанесению покрытий (механическая обработка, отделочно-упрочняющая обработка, очистка поверхностей от загрязнений и удаление различных пленок); 2-й этап – напыление детонационных функционально-ориентированных покрытий; 3-й этап – окончательное формообразование и отделочно-упрочняющая обработка.

Основной особенностью технологического обеспечения для напыления детонационных функционально-ориентированных покрытий является наличие гибкой структуры системы, управляемых систем и элементов структуры установки. Такое структурирование технологической системы для напыления обусловлено

необходимостью варьирования видами материалов и их структуры, составами материалов и зернистостью напыляемого порошка. При этом эти изменения могут быть плавными, функционально-зависимыми, ступенчатыми и других видов.

Для повышения эффективности процессов напыления детонационных функционально-ориентированных покрытий и расширения технологических возможностей могут применяться различные виды структур детонационных установок (рис. 5): 1, 2, 3 – детонационные стволы; 4 – напыляемая деталь; 5 – прогреватель детали (покрытия); B_1 – вращательное движение детали; $П_2$ – прямолинейно перемещение; α_1 и α_2 – углы между стволами; l_1 и l_2 – расстояние между стволами. Приведенные структурные варианты детонационных технологических систем позволяют реализовывать функционально-ориентирован-

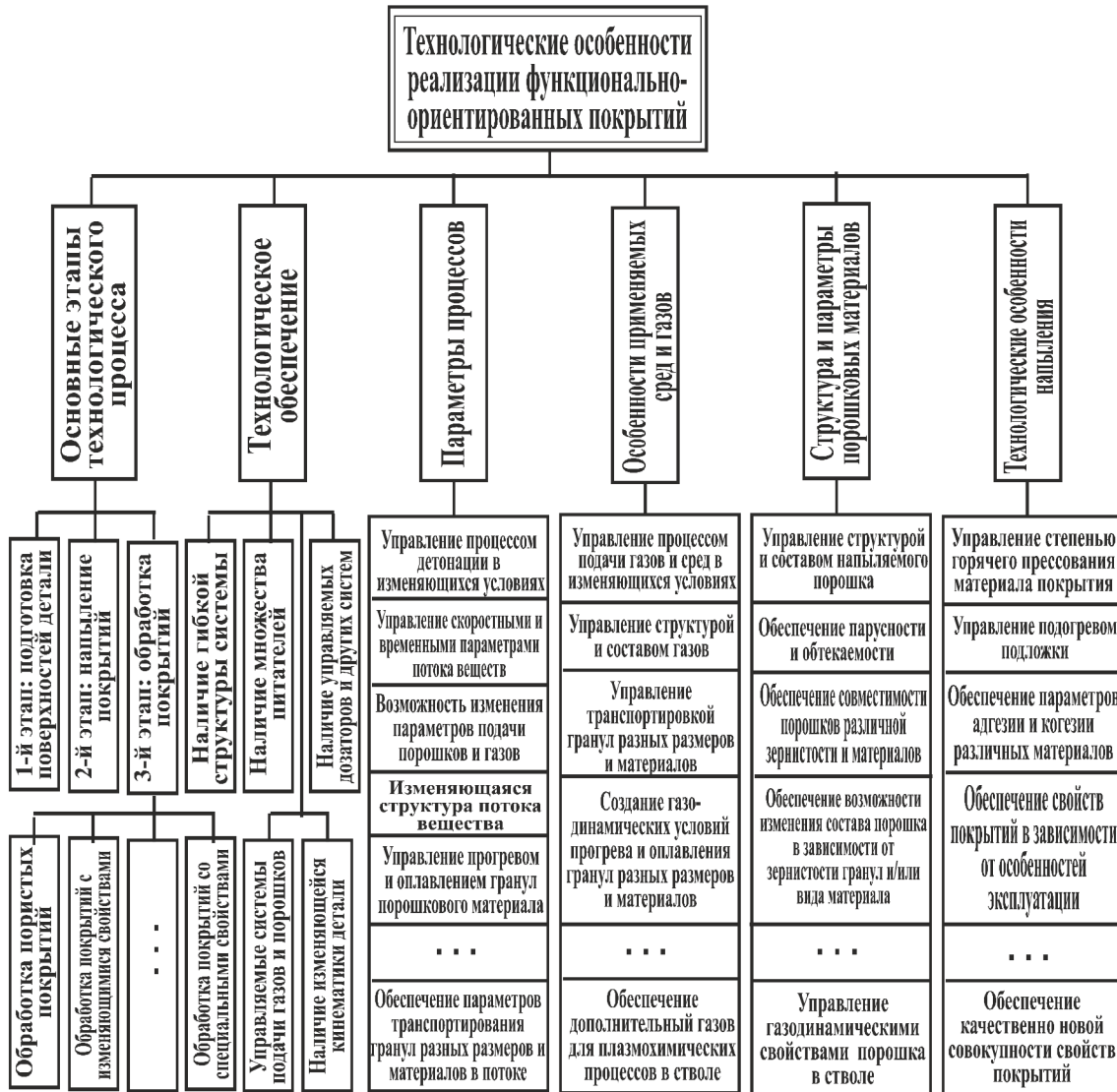


Рис. 4. Технологические особенности реализации детонационных функционально-ориентированных покрытий

ные покрытия деталей. Причем в сочетании с определенной структурой движений эти системы могут реализовывать функции 3D-принтеров.

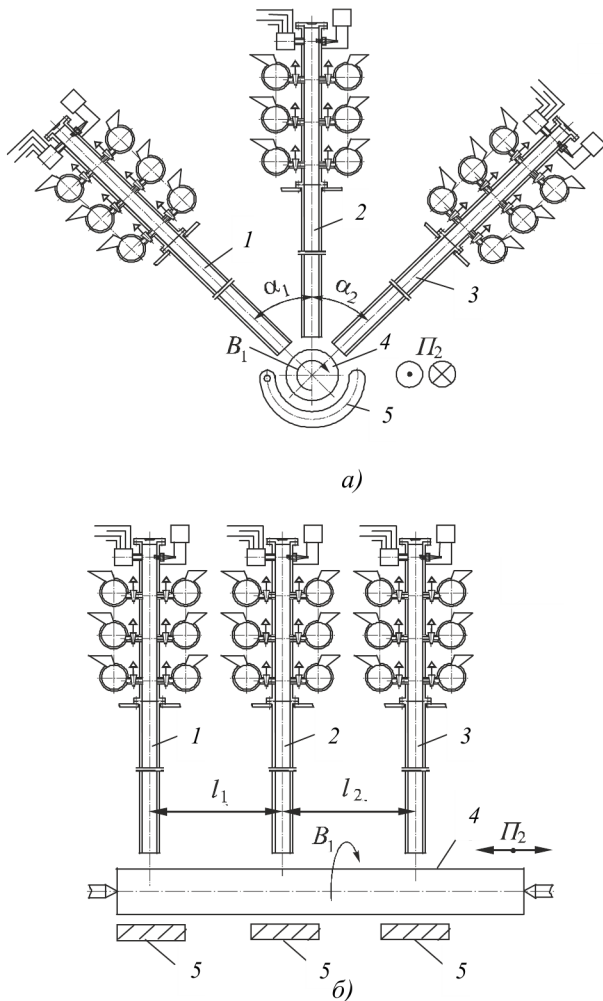


Рис. 5. Структурные варианты детонационных технологических систем для напыления функционально-ориентированных покрытий:
 а – радиальное расположение детонационных стволов;
 б – осевое расположение детонационных стволов

Следует также отметить, что параметры процесса в детонационном стволе (см. рис. 4) при напылении функционально-ориентированных покрытий также должны иметь возможность управления всеми параметрами, а именно основными параметрами процесса в детонационном стволе, подачей газов, сред и напыляемого порошкового материала. При этом порошковый материал [7] должен подаваться в детонационный ствол с заданными параметрами, а именно с возможностью управления свойствами, составом и структурой.

Приведенная наукоемкая технология по-

зволяет повысить эксплуатационные свойства деталей машин, работающих в сложных условиях действия переменных эксплуатационных функций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Григоров А.И., Тананов А.И., Федько Ю.П. Некоторые особенности строения и свойств покрытий, полученных детонационным напылением // *Машиноведение*. 1976. № 3. С. 82–86.
2. Шоршоров М.Х., Харламов Ю.А. Физико-химические основы детонационно-газового напыления покрытий. М.: Наука, 1978. 224 с.
3. Зверев А.И., Астахов Е.А., Шаривкер С.Ю. Детонационные покрытия в судостроении. М.: Судостроение, 1979. 232 с.
4. Бартенев С.С., Федько Ю.П., Григоров А.И. Детонационные покрытия в машиностроении. Л.: Машиностроение, 1982. 215 с.
5. Михайлов А.Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий. Донецк: ДонНТУ, 2009. 346 с.
6. Михайлов А.Н., Михайлов Д.А., Грубка Р.М., Петров М.Г., Повышение долговечности деталей машин на базе функционально-ориентированных покрытий // *Научные технологии в машиностроении*. 2015. №7 (49). С. 30–39.
7. Цыркин А.Т., Михайлов А.Н., Петров М.Г., Головатинская В.В. Формирование структуры и свойств порошковых материалов. Донецк: ДонНТУ, 2013. 162 с.

REFERENCES

1. Grigorov, A.I., Tananov, A.I., Fedko, Yu.P., Some Peculiarities of structure and properties of coatings obtained by detonation spraying // *Engineering Science*. 1976. № 3. pp. 82–86.
2. Shorshorov, M.Kh., Kharlamov, Yu.A. *Physical-Chemical Basis for Detonation-Gas Spraying of Coatings*. M.: Science, 1978. pp. 224.
3. Zverev, A.I., Astakhov, E.A., Sharivker, S.Yu. *Detonation Coatings in Shipbuilding*. M.: Shipbuilding, 1979. pp.232.
4. Bartenev, S.S., Fedko, Yu.P., Grigorov, A.I., *Detonation Coatings in Mechanical Engineering*. L.: Mechanical Engineering, 1982. pp.215.
5. Mikhailov, A.N., *Fundamentals of Synthesis of Functionally-Oriented Techniques*. Donetsk: DonNTU, 2009. pp. 346.
6. Mikhailov, A.N., Mikhailov, D.A., Grubka, R.M., Petrov, M.G., Machinery life increase based on functionally-oriented coatings // *Science intensive technologies in Mechanical Engineering*. 2015. №7 (49). pp. 30–39.
7. Tsyркиn, A.T., Mikhailov, A.N., Petrov, M.G., Golovyayinskaya, V.V. *Formation of Structure and Properties of Powder Materials*. Donetsk: DonNTU, 2013. pp. 162.

Рецензент д.т.н. А.М. Марков