

ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Михайлов А.Н., Михайлов Д.А., Грубка Р.М., Петров М.Г.

(ДонНТУ, г. Донецк, ДНР)

Тел./факс +38 062 3050104; E-mail: tm@mech.dgtu.donetsk.ua

Abstract: *Given the scientific principles and the basic data to improve the durability of parts based on function-oriented coatings, which allow you to adapt to the peculiarities of the details of their operation. Provides general principles for the implementation of these coatings and to develop the necessary technological support. The classification of function-oriented coatings.*

Keywords: *parts; coatings; functionally-oriented features.*

Введение. Научно-технический прогресс ставит перед машиностроителями все новые более сложные задачи, связанные с обеспечением качественно новой совокупностью свойств деталей машиностроения, автоматизацией производственных процессов, повышением эффективности производства, снижением себестоимости изготовления изделий, экологической безопасностью производства и решением других насущных проблем. Это обусловлено запросами общества, возможностями науки, техники и развитием экономики.

Одним из перспективных направлений повышения качества деталей машин является обеспечение их свойств на базе применения специальных покрытий [1, 2, 3, 4]. В настоящее время, существующие виды покрытий позволяют решать целое множество различных проблем, связанных с повышением качества деталей машин, а именно: снижают износ поверхностного слоя, коррозионные разрушения, окислительные процессы, солевые, кислотные и щелочные воздействия, эрозионные разрушения, уменьшают повреждаемость основного материала, повышают жаростойкость и параметры теплостойкости деталей, снижают температурные воздействия на основной материал, улучшают внешний вид, решают проблемы декоративности и эстетики, а также целый комплекс других вопросов.

Для покрытий деталей машин используются различные материалы и их комбинации, составы и структуры веществ. При этом широко применяются металлические и интерметаллидные, композитные и композиционные покрытия, а также комплексные и комбинированные покрытия. Покрытия поверхностей деталей машин могут быть однослойными и многослойными.

Для нанесения покрытий деталей машин применяется множество различных методов. К наиболее перспективным методам нанесения покрытий можно отнести следующие: химическое осаждение (HT-CVD), физическое осаждение (PVD), электролитический способ, газотермического напыления, электроискрового легирования, наплавки.

Особенности разрушений функциональных элементов деталей при эксплуатации. Применение различных видов покрытий позволяют существенно повысить эксплуатационные параметры деталей машин и решить целый комплекс функциональных задач. Вместе с тем, обычно, процесс эксплуатации деталей с покрытиями в машинах связан со сложными особенностями разрушений, а именно:

1. Неравномерным износом поверхности детали.
2. Неравномерными коррозионно-эрозионными и другими разрушениями поверхности детали.
3. Действием неравномерной удельной контактной нагрузки по поверхности детали.

4. Действием неодинаковых эксплуатационных функций по различным поверхностям детали (не одинаковые параметры структуры эксплуатационных функций) и других особенностей эксплуатации.

В качестве примера на рис. 1 приведены схемы механизмов, поясняющие неравномерное действие относительных скоростей в элементах механизмов и вызывающих неравномерный износ поверхностей детали.

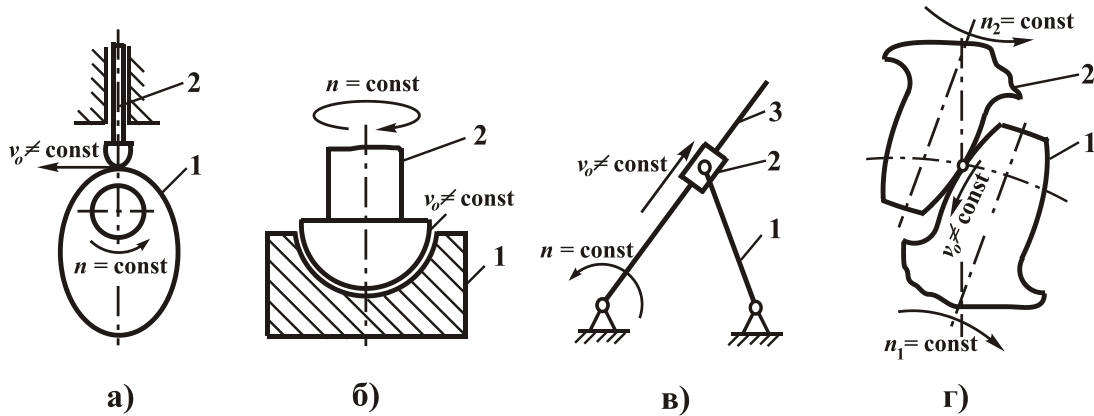


Рис. 1. Схемы, поясняющие неравномерное действие относительных скоростей в элементах механизмов: **а** – кулачковый механизм, **б** – шаровая опора, **в** – кулисный механизм, **г** – зубья зубчатой передачи

Здесь, на рис. 1,а приведен кулачковый механизм, на рис. 1,б – шаровая опора, на рис. 1,в – кулисный механизм, на рис. 1,г – зубья зубчатой передачи. Во всех приведенных механизмах действуют переменные скорости относительного движения элементов, что вызывает неравномерный износ функциональных элементов по длине их перемещения. Для обеспечения процесса равномерного износа функциональных элементов приведенных механизмов необходима реализация переменных физико-механических свойств функциональных элементов в зависимости от действия эксплуатационных функций.

В качестве другого примера неравномерного действия эксплуатационных функций можно привести лопатку компрессора газотурбинного двигателя ТВ3-117. Здесь, по поверхности корыта пера лопатки действуют неравномерные эрозионно-коррозионные разрушения покрытия и основного материала тела лопатки (рис. 2).

Этот процесс обусловлен пространственной формой элементов лопатки и кинематикой её движения, особенностями движения газовых потоков в тракте двигателя и действием частиц пыли и жидкости. Разрушение покрытия на лопатке обычно начинается на входной кромке 1 пера в зоне пересечения входной и периферийной кромок. Далее, разрушение покрытия распространяется от этой зоны по входной кромке вниз к замку лопатки и по периферийной кромке к выходной кромке 2. Затем, от этих зон начинает разрушаться покрытие на поверхности корыта 3 лопатки, и потом покрытие остаётся только в зоне 4 поверхности корыта лопатки.

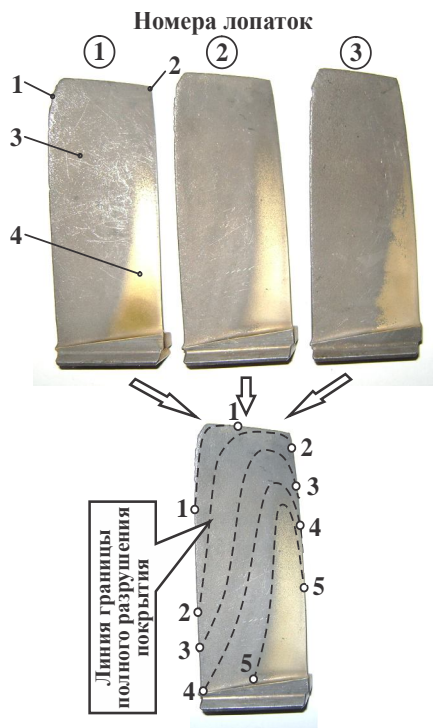


Рис. 2. Схема неравномерного разрушения нитрид титанового покрытия поверхности пера лопатки:

- 1 – разрушения входной кромки пера,
- 2 – разрушения выходной кромки пера,
- 3 – поверхность без покрытия,
- 4 – поверхность с покрытием

Для достижения поставленной цели в данной работе предусмотрено решение следующих задач: выполнить анализ особенностей разрушений функциональных элементов деталей при эксплуатации; разработать общий подход и принципы реализации функционально-ориентированных покрытий; разработать классификацию функционально-ориентированных покрытий; предложить технологическое обеспечение и исследовать особенности реализации функционально-ориентированных свойств деталей. Эти задачи решаются в данной работе.

Общий подход и принципы реализации функционально-ориентированных покрытий деталей машин. При эксплуатации детали на нее 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. В этих условиях для обеспечения функционально-ориентированных свойств деталей необходимо определить соответствия между эксплуатационными функциями F , технологическими воздействиями TB и свойствами C изделия (рис. 3).

На рис. 2 представлена схема разрушения нитрид титанового покрытия поверхности пера лопатки со стороны корыта в зависимости от длительности эксплуатации (штриховые линии показывают границы полного разрушения покрытия, которые изменяются во времени).

Этот пример также показывает, что лопатки компрессора с покрытиями при эксплуатации разрушаются не равномерно. При этом даже при их длительной эксплуатации часть покрытия остается на поверхностях пера лопаток (рис. 2). Причем в процессе эксплуатации лопатки, в местах полного разрушения покрытия, происходит интенсивное разрушение основного материала пера (тела) лопатки, тогда как в зонах, где покрытие не разрушено основной материал пера не подвергается разрушениям. Эти процессы неравномерного коррозионно-эрозионного разрушения приводят, в ряде случаев, к потере ремонтпригодности лопаток.

Можно привести множество других механизмов машин, в функциональных элементах деталей которых действуют переменные эксплуатационные функции. Переменность действия эксплуатационных функций приводит к снижению эксплуатационных свойств изделий, а в ряде случаев к их быстрой поломке в процессе функционирования [5, 6].

Целью данной работы является повышение качества деталей машин на основе создания специальных свойств каждой поверхности детали и структуры свойств всей детали в условиях действия множества неравномерных эксплуатационных функций за счет обеспечения функционально-ориентированных покрытий [5, 6].

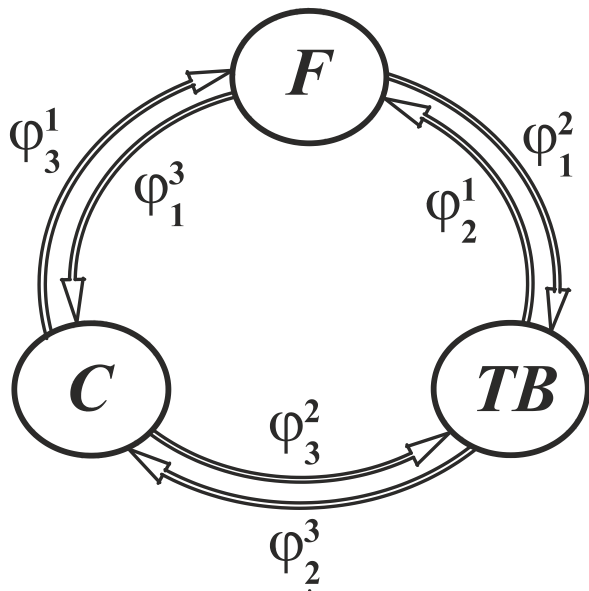


Рис. 3. Модель взаимосвязей φ_i^j объектов системы: эксплуатационные функции F , технологические воздействия TB и свойства C детали

Между эксплуатационными функциями F , технологическими воздействиями TB и свойствами C изделия действуют определенные связи [5], а именно: подобия, соответствия, идентичности, аналогии, эквивалентности и адекватности.

На рис. 3. 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 покрытия [5]. 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 функциональные элементы детали. Все эти параметры определяются на базе группы особых принципов ориентации свойств и технологических воздействий [5]:

1. Функционального соответствия особенностей действия элементарной функции в каждом функциональном элементе детали, характеристик реализации технологических воздействий и параметров обеспечения необходимых свойств этом функциональном элементе детали на каждом уровне глубины технологии.

2. Топологического соответствия геометрических параметров функционального элемента детали, в котором действует элементарная функция при эксплуатации, геометрическим параметрам зонального элемента реализации технологических воздействий потоков материи, энергии и информации на деталь и геометрических параметров зонного элемента обеспечения необходимых свойств на каждом уровне глубины технологии.

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 на каждом уровне глубины технологии.

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

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 на каждом уровне глубины технологии.

6. Структурного соответствия действия множества элементарных функций, реализации множества технологических воздействий и выполнения множества свойств

в функциональных элементах детали из условия обеспечения заданных, требуемых или предельных свойств всей детали на каждом уровне глубины технологии.

7. Адекватного структурно-функционального соответствия свойств в пространстве и во времени каждого функционального элемента заданному, требуемому или предельному потенциалу общих свойств всей детали в целом на каждом уровне глубины технологии.

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 на каждом уровне глубины технологии.

При этом можно отметить, что процесс реализации приведенных принципов ориентации технологических воздействий и свойств детали должен выполняться на базе итерационного подхода [5]. Итерационный подход дает возможность выполнять синтез функционально-ориентированных покрытий посредством реализации приведенных принципов с учетом, как последовательных процессов, так и многократных повторяющихся возвратных процессов, выполняемых за счет обратных связей.

Рассмотрим более детально два первых приведенных принципа ориентации технологических воздействий и свойств детали (изделия).

Можно отметить, что на основании *первого принципа* обеспечивается функциональное соответствие особенностей действия элементарной функции в каждом функциональном элементе детали, характеристик реализации технологических воздействий и параметров обеспечения необходимых свойств в этом функциональном элементе детали (рис. 4) на каждом уровне глубины технологии.

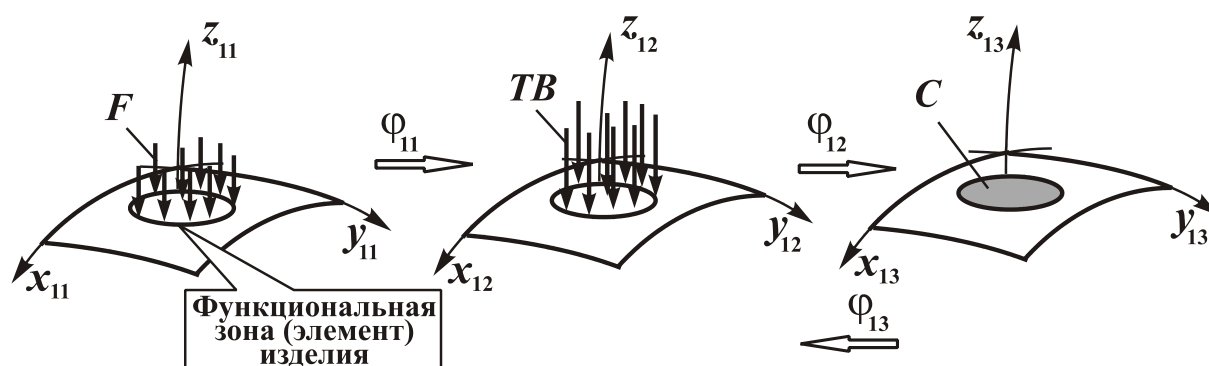


Рис. 4. Гипотетическая схема, поясняющая реализацию **первого принципа ориентации** технологических воздействий TB и свойств C функционального элемента изделия в зависимости от действия эксплуатационной функции F

Этот принцип отвечает на вопрос: **какое** технологическое воздействие или свойство детали нужно выполнить или обеспечить в зависимости от особенностей действия эксплуатационной функции? То есть он обеспечивает заданное свойство функционального элемента в микро, макро зоне и участке детали. Поэтому первый принцип ориентации технологических воздействий и свойств детали в соответствии с действующей функцией можно математически представить следующими тремя отображениями (преобразованиями):

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{11} : F &\rightarrow TB; \\ \varphi_{12} : TB &\rightarrow C; \\ \varphi_{13} : C &\rightarrow F, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где φ_{11} - отображение (преобразование) эксплуатационной функции F детали в технологические воздействия TB ;

φ_{12} - отображение (преобразование) технологических воздействий TB в свойства C детали;

φ_{13} - отображение (преобразование) свойств C в технологические воздействия TB .

Следует иметь в виду, что представленная система отображений (1) имеет замкнутую форму, поэтому решение этих уравнений может быть выполнено на основании итерационных методов последовательного приближения с использованием множества рекуррентных циклов.

Также можно отметить, что соответствие может быть изоморфным или гомоморфным. В связи с этим, первый принцип может обеспечивать полное или частичное соответствие параметров ориентации технологических воздействий и свойств.

На базе **второго принципа** реализуется выполнение топологического соответствия геометрических параметров функционального элемента детали, в котором действует элементарная функция при эксплуатации, геометрическим параметрам элемента реализации технологических воздействий потоков материи, энергии и информации на детали и геометрических параметров элемента обеспечения необходимых свойств (рис. 5) на каждом уровне глубины технологии. Этот принцип, в полной мере, дает ответы на вопросы: **куда** нужно реализовывать технологические воздействия и **где** обеспечивать необходимые свойства детали? Он отвечает за пространственную точность реализации технологических воздействий в заданные функциональные микро, макро зоны и участки детали, а также за пространственное расположение в них необходимых свойств детали.

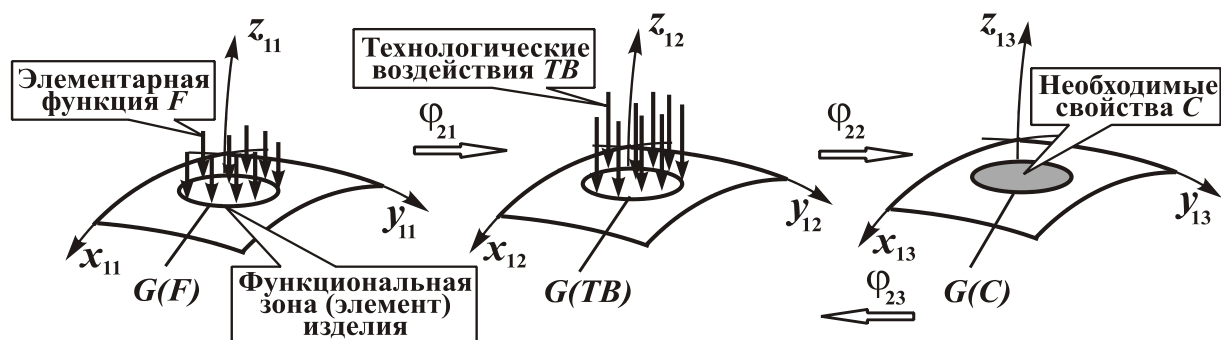


Рис. 5. Гипотетическая схема, поясняющая реализацию **второго принципа ориентации** технологических воздействий TB и свойств C функционального элемента детали в зависимости от действия эксплуатационной функции

При этом второй принцип ориентации можно описать следующими тремя отображениями (преобразованиями):

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{21} : G(F) &\rightarrow G(TB); \\ \varphi_{22} : G(TB) &\rightarrow G(C); \\ \varphi_{23} : G(C) &\rightarrow G(F), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где φ_{21} - отображение (преобразование) геометрических параметров зоны действия эксплуатационной функции $G(F)$ изделия в геометрические параметры зоны реализации технологических воздействий $G(TB)$;

φ_{22} - отображение (преобразование) геометрических параметров зоны реализации технологических воздействий $G(TB)$ в геометрические параметры зоны обеспечения свойств $G(C)$ детали;

φ_{23} - отображение (преобразование) геометрических параметров зоны обеспечения свойств $G(C)$ в геометрические параметры зоны действия эксплуатационной функции $G(F)$ детали.

Здесь также следует иметь в виду, что представленная система отображений (2) имеет замкнутую форму, поэтому решение этих уравнений может быть выполнено на основании итерационных методов последовательного приближения с использованием множества рекуррентных циклов.

А также можно отметить, что в данном случае соответствие может быть изоморфным или гомоморфным. В связи с этим, второй принцип может обеспечивать полное или частичное соответствие геометрических параметров ориентации технологических воздействий и свойств.

Можно отметить, что другие шесть принципов обеспечения ориентации технологических воздействий и свойств покрытий в зависимости от действия эксплуатационных функций приведены в работе [5].

Функционально-ориентированные покрытия (ФОП) могут иметь следующие свойства (рис. 6):

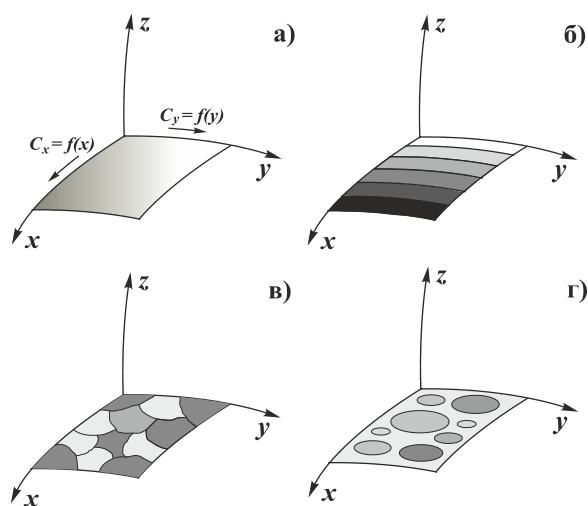


Рис. 6. Гипотетические варианты однослойных ФОП

1. Изменяющиеся свойства (равномерно- и неравномерно-изменяющиеся, функционально-изменяющиеся, градиентные и другие) (рис. 6,а) в пределах каждой поверхности изделия и/или структуры поверхностей детали.

2. Ступенчатые свойства (в одном направлении, в двух направлениях, широкие, средние, мелкие ступени и другие) (рис. 6,б) в пределах каждой поверхности изделия и/или структуры поверхностей детали.

3. Зональные свойства (традиционные размеры зон, макро-зональные, микро-зональные, с изменяющимися свойствами по зонам и другие) (рис. 6,в) в пределах каждой поверхности детали и/или структуры

поверхностей детали.

4. Пятнистые свойства (пятна больших, средних, малых размеров, с разными или одинаковыми свойствами и другие) (рис. 6,г) в пределах каждой поверхности детали и/или структуры поверхностей детали.

5. Специальные свойства в пределах каждой поверхности изделия и/или структуры поверхностей детали.

ФОП деталей машин обеспечивают выполнение следующих особенностей эксплуатации при действии изменяющихся параметров функции по поверхности и неодинаковых структурных составляющих множества функций по детали:

1. Полную адаптацию детали при изготовлении к особенностям ее эксплуатации в машине или технологической системе.
2. Предельный эксплуатационный потенциал детали в машине или кратный предельному эксплуатационному потенциалу (величина кратности определяется проектировщиком).
3. Единовременный полный износ всего покрытия на поверхности детали в заданный период ее эксплуатации.
4. Единовременный полный износ всех видов покрытий на всех поверхностях детали.
5. Качественно новую совокупность свойств изделия для эксплуатации и другие особенности.

Классификация функционально-ориентированных покрытий. Можно отметить, что применяемые покрытия для изделия машиностроения могут иметь различные физико-механические свойства, параметры которых формируются в пределах, свойственных сверхпрочным и традиционным покрытиям. Покрытия могут иметь переменную толщину по поверхности изделия, определяющуюся в зависимости от действия эксплуатационной функции. При этом на различных поверхностях детали могут наноситься покрытия с различной толщиной и свойствами. Кроме того, наносимые покрытия на поверхностях деталей могут быть однослойными и многослойными (рис. 7).

На рис. 7 представлены структурные варианты. Здесь показано: рис. 7,а – однослойное покрытие типа единовременно-единовременное непрерывное, рис. 7,б – многослойное покрытие типа единовременно-единовременное прерывистое.

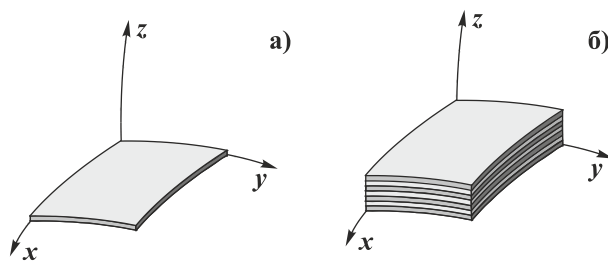


Рис. 7. Гипотетические схемы покрытий:
а – однослойное; б – многослойное

Однослойные покрытия (рис. 7, а) могут формироваться на базе одного или нескольких материалов или их композиций. В этом случае, по высоте покрытия z свойства наносимого покрытия одинаковые и оно формируется непрерывно. Эти покрытия в направлении x и y по поверхности детали формируются единовременно в двух направлениях. В направлении z покрытие формируется непрерывно. Поэтому в целом однослойное покрытие можно

обозначить как тип единовременно-единовременное непрерывное.

Математическая структурно-функциональная символьная модель этого покрытия может быть представлена следующим выражением [5]:

$$V_o \rightarrow \bigwedge_{v=1}^{\infty} \left\{ (m_{x,y,z}, e_{x,y,z}, i_{x,y,z}), \left(\bigwedge_{x=1}^{\infty} dl_x \times \bigwedge_{y=1}^{\infty} dl_y \times dl_z \right) \right\}, \quad (3)$$

где V_o - обозначение однослойного покрытия типа единовременно-единовременное непрерывное;

$(m_{x,y,z}, e_{x,y,z}, i_{x,y,z})$ - кортеж параметров технологических воздействий материального, энергетического и информационного характеров;

$(dl_x \times dl_y \times dl_z)$ - декартово произведение в x -м, y -м и z -м направлениях или окрестность объемной точки;

\wedge - предикат алгебры логики (конъюнкция) или обозначение непрерывности процесса напыления покрытия в направлении z .

Многослойные покрытия (рис. 7,б) формируются слоями. При этом в каждом слое в направлении x и y по внутренней цилиндрической поверхности изделия формируются одновременно. В направлении z покрытие формируется прерывисто. Поэтому в целом данное многослойное покрытие можно обозначить как тип одновременно-одновременно прерывистое. Математическая структурно-функциональная символическая модель этого покрытия может быть представлена следующим выражением [5]:

$$V_m \rightarrow \bigvee_{z=1}^n \left\{ (m_{x,y,z}, e_{x,y,z}, i_{x,y,z}), (\bigwedge_{x=1}^{\infty} dl_x \times \bigwedge_{y=1}^{\infty} dl_y \times dl_z) \right\}, \quad (4)$$

где V_m - обозначение многослойного покрытия типа одновременно-одновременно прерывистое;

n - число слоев различных покрытий;

\bigvee - предикат алгебры логики (дизъюнкция) или обозначение прерывистости процесса напыления покрытия в направлении z .

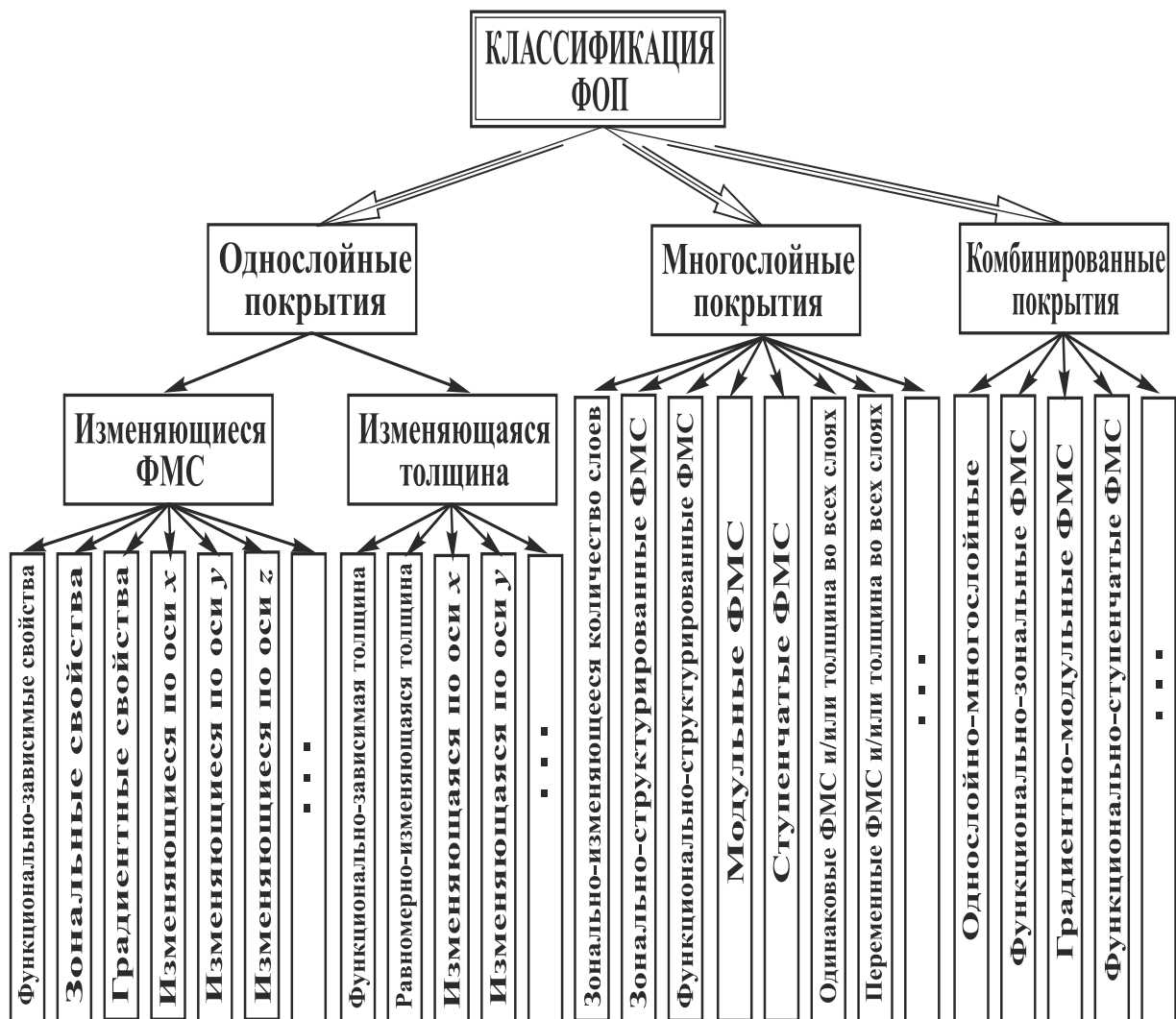


Рис. 8. Классификация ФОП для деталей машин

Следует отметить, что толщина каждого слоя многослойного покрытия в общем случае может быть различной и зависеть от функциональных особенностей данного покрытия.

ФОП можно использовать для различных деталей машин. При этом их можно классифицировать в виде схемы, представленной на рис. 8. Здесь, ФОП сгруппированы следующим образом: однослойные покрытия, многослойные покрытия, комбинированные покрытия.

Однослойные ФОП могут иметь изменяющиеся ФМС и быть изменяющейся толщины. При этом ФОП с изменяющимися ФМС могут иметь следующие виды свойств: функционально-зависимые свойства, зональные свойства, градиентные свойства, изменяющиеся по оси x , изменяющиеся по оси y , изменяющиеся по оси z , другие свойства.

Для выполнения одновременного полного износа покрытия при действии неравномерного его износа на функциональных элементах детали, в ряде случаев, можно применять однослойные покрытия изменяющейся толщины, со следующими параметрами: функционально-зависимая толщина, равномерно-зависимая толщина, изменяющиеся по оси x , изменяющиеся по оси y , другие свойства.

Для повышения ресурса детали применяют многослойные покрытия, которые

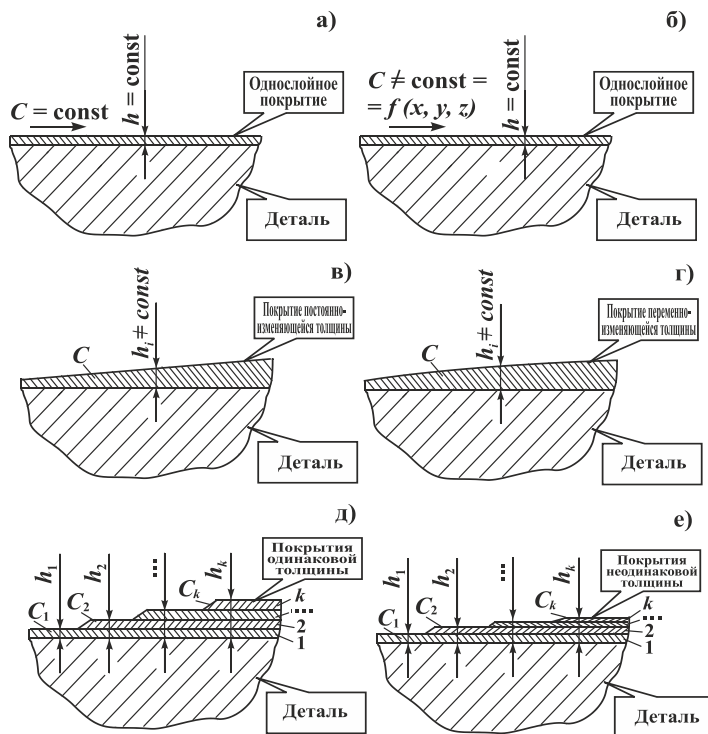


Рис. 9. Некоторые варианты ФОП детали:

- а – однослойное покрытие постоянной толщины и свойств;
- б - однослойное покрытие постоянной толщины и переменными свойствами;
- в - однослойное покрытие переменнo-изменяющейся толщины и постоянными свойствами;
- г - однослойное покрытие постоянно-изменяющейся толщины и постоянными свойствами;
- д – зонально-многослойное покрытие со слоями одинаковой толщины;
- е - зонально-многослойное покрытие со слоями неодинаковой толщины

могут иметь следующие особенности: зонально-изменяющееся количество слоев, зонально-структурированные ФМС, функционально-структурированные ФМС, модульные ФМС, ступенчатые ФМС, одинаковые ФМС и/или толщина во всех слоях, переменные ФМС и/или толщина во всех слоях, другие свойства.

В ряде случаев целесообразно применять для деталей комбинированные покрытия, имеющие следующие особенности: однослойно-многослойные покрытия, функционально-зональные ФМС, градиентно-модульные ФМС, функционально-ступенчатые ФМС,- другие свойства.

На рис. 9 представлены некоторые варианты ФОП детали: рис. 9,а – однослойное покрытие постоянной толщины и свойств; рис. 9,б - однослойное покрытие постоянной толщины и

переменными свойствами; рис. 9,в - однослойное покрытие переменнo-изменяющейся толщины и постоянными свойствами; рис. 9,г - однослойное покрытие постояннo-изменяющейся толщины и постоянными свойствами; рис. 9,д – зонально-многослойное покрытие со слоями одинаковой толщины; рис. 9,е - зонально-многослойное покрытие со слоями неодинаковой толщины.

Приведенные математические структурно-функциональные символные модели однослойных и многослойных покрытий, а также варианты функционально-ориентированных покрытий позволяет выполнять синтез заданных или требуемых свойств детали. Отметим, что процесс синтеза необходимых свойств детали может выполняться на базе морфологического подхода с использованием морфологических матриц и методов морфологического синтеза вариантов покрытий, в том числе и патентоспособных. Этот подход позволяет отыскивать новые нетрадиционные свойства покрытий.

Технологическое обеспечение и особенности реализации функционально-ориентированных свойств деталей. Для реализации функционально-ориентированных покрытий необходимо технологическое обеспечение, а именно технологические установки обеспечивающие нанесение покрытий на базе группы особых принципов ориентации технологических воздействий и обеспечения свойств деталей.

Для изготовления деталей с ФОП в Донецком национальном техническом университете созданы специальные установки:

1. Установка для вакуумного ионно-плазменного напыления ФОП, выполненная на базе модернизированной системы ННВ 6.6-И1.
2. Специальная детонационная установка для напыления ФОП.
3. Устройство для формирования 3D-функционально-ориентированных покрытий (легированных слоев), работающее наподобии печатающего принтера с обеспечением заданного «рисунка» свойств. Предлагаемое устройство работает на базе электроискрового легирования поверхностного слоя детали с обеспечением функционально-ориентированных свойств.

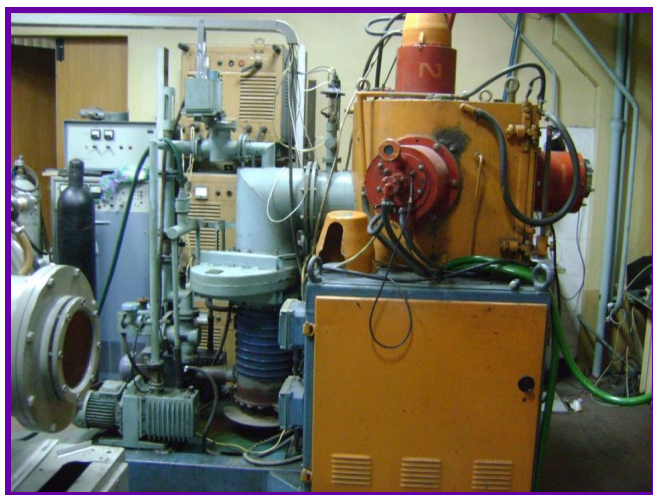


Рис. 10. Установка для нанесения функционально-ориентированных вакуумных ионно-плазменных покрытий

На рис. 10 представлена установка для вакуумного ионно-плазменного напыления ФОП, выполненная на базе модернизированной системы ННВ 6.6-И1. На этой установке обеспечивается возможность реализации ФОП для различных деталей машин.

Рассмотрим более детально процесс реализации ФОП для лопатки компрессора газотурбинного двигателя.

На рис. 11 представлена схема разрушения старого и последовательного формирования многослойного ФОП на 6-ти этапах – по одному на каждом. На схеме разрушения старого покрытия показана зона начала полного разрушения покрытия $1-a_1-b-1^1$, которая последовательно распространяется до зоны $2-1-a_1-b-1^1-2^1-a_2$, затем до зоны $3-2-1-a_1-b-1^1-2^1-3^1-a_3$ и так

далее до зоны $5-4-3-2-1-a_1-b-1^I-2^I-3^I-4^I-5^I-a_n$. В соответствии с этими особенностями разрушения покрытия при эксплуатации лопатки в работе предлагается последовательно формировать многослойное покрытие с топологической ориентацией каждого слоя покрытия на поверхности пера лопатки, в соответствии с особым принципом ориентации покрытия, описанного выражением (2). В этом случае ФОП формируется с использованием специальных экранирующих матриц.



Рис. 11. Схема формирования многослойного ФОП

Таким образом, многослойное ФОП формируется в результате последовательного нанесения однослойных покрытий на каждом этапе с учетом выражения (2) топологической ориентации покрытия каждого слоя (рис. 11). Здесь, наносится покрытие № 1 с топологической ориентацией его на поверхности в соответствии со схемой износа, затем покрытие № 2, далее покрытие № 3 и так далее, в конце наносится покрытие на все поверхности пера лопатки. В этом случае, свойства каждого покрытия может определяться в соответствии с выражением (1).

Многослойные покрытия, сформированные в соответствии с выражениями (1) и (2) обладают свойством одновременного полного разрушения в заданный период эксплуатации лопаток компрессора ГТД. Это позволяет в длительный период времени исключить возможность разрушения основного материала пера лопатки и одновременно повысить технико-экономические показатели их восстановления.

На рис. 12 представлена специальная детонационная установка для напыления ФОП. Функционально-ориентированные свойства покрытия формируется за счет наличия в установке трех дозаторов и накопителей для различных видов порошковых материалов и смешивания их в установке в зависимости от действия эксплуатационных функций.

При работе установки ствол заполняется смесью газов, способных детонировать, при этом в ствол подается заданная навеска смеси порошковых материалов, состав которой изменяется в соответствии с особенностями структуры ФОП, и срабатывает воспламенитель (свеча поджига). При этом горение газов переходит в детонацию.



Рис. 12. Детонационная установка для напыления функционально-ориентированных покрытий

Детонационная волна представляет собой комплекс ударной волны и зоны химической реакции. Детонационная волна перемещается по стволу установки со сверхзвуковой скоростью.

При истечении по стволу установки продукты детонации увлекают разогретые напыляемые частицы смеси порошкового материала и происходит процесс напыления покрытия. При этом имеет место процессы их плавления и испарения. При нанесении покрытий детонационные процессы повторяются с частотой до 5 ... 10 выстрелов в секунду. При этом обеспечивается возможность изменять свойства покрытия в зависимости от особенностей смешивания порошкового материала из трех дозаторов и накопителей, процесс смешивания которых определяется свойствами ФОР, определяемыми выражением (1). В процессе нанесения ФОР происходит горячее прессование заданного слоя покрытия из различных материалов.

На рис. 13 представлено устройство для формирования 3D-функционально-ориентированных покрытий (легированных слоев). Здесь показано: рис. 13,а – схема устройства, рис. 13,б – зона и элементы для формирования покрытий, рис. 13,в – схема покрытия с изменяющимися 3D-свойствами.

Предлагаемое устройство (рис. 13) работает на подобии печатающего принтера с обеспечением заданного «рисунка» свойств. При этом выполняется электроискровое легирование поверхностного слоя детали с обеспечением функционально-ориентированных свойств.

Устройство содержит следующие элементы: 1 – цилиндрическая деталь (катод); 2 – система блоков инструментов; 3, 4, 5, 6 – блоки инструментов; 7, 8, 9, 10 – сменные легирующие инструменты (электроды - аноды), выполненные например из четырех различных материалов: 7 – из молибдена, 8 – из вольфрама, 9 – из ванадия, 10 – хрома; 11 – сердечник катушки; 12 – катушка (соленоид); 13 – пружина (упругий элемент); 14 – регулятор положения электрода, обеспечивающий заданную амплитуду его вертикального возвратно-поступательного движения; 15 – направляющие для продольных возвратно-поступательных движений системы блоков инструментов; 16 – электрическая дуга между электродами при электроискровом легировании; 17 – единичная зона включения одного легирующего металла на поверхности детали (диаметром r); 18 – один поверхностный слой легирующих металлов с множеством зон их включений.

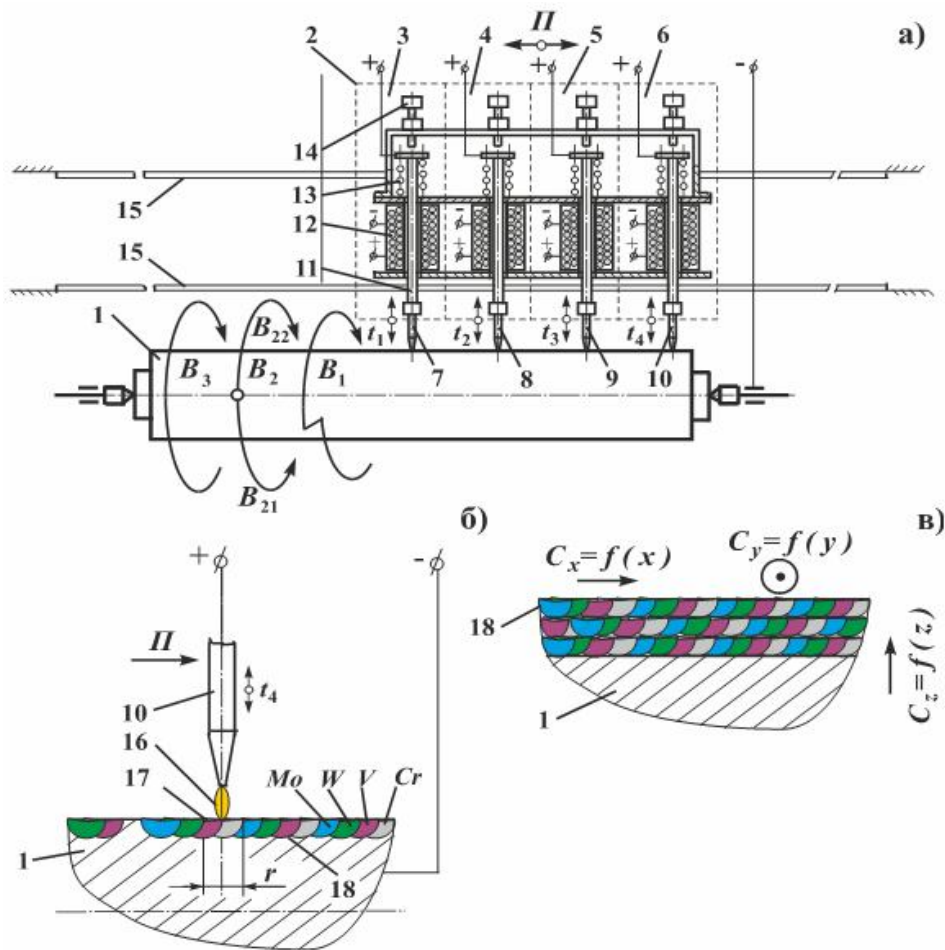


Рис. 13. Устройство для формирования 3D-функционально-ориентированных покрытий (легированных слоев): а – схема устройства, б – зона и элементы для формирования покрытий, в – схема покрытия с изменяющимися 3D-свойствами

Можно отметить, что на базе предлагаемой установки (рис. 13) механизм формирования легированного слоя покрытия осуществляется вследствие как перенесения и взаимодействия материала электродов, так и теплового действия искрового разряда. При этом заданные свойства поверхностного слоя покрытия могут реализовываться как за счет отдельных материалов анодов, так и посредством сочетаний смеси материалов четырех анодов.

Работа предлагаемого устройства (рис. 13) может выполняться на базе нескольких схем.

На рис. 14 представлены варианты схем трассирования инструмента относительно детали (развертка). Здесь показано: рис. 14,а – движение B_1 периодически, движение Π возвратно-поступательное; рис. 14,б - движение B_2 возвратно-вращательное, движение Π возвратно-поступательное; рис. 14,в - движение B_3 постоянное вращательное, движение Π возвратно-поступательное.

Следует отметить, что для реализации ФОП может применяться большое множество методов и вариантов установок. Это зависит от особенностей конкретной детали, параметров ФОП, кинематики движений, метода реализации покрытия и множества других условий.

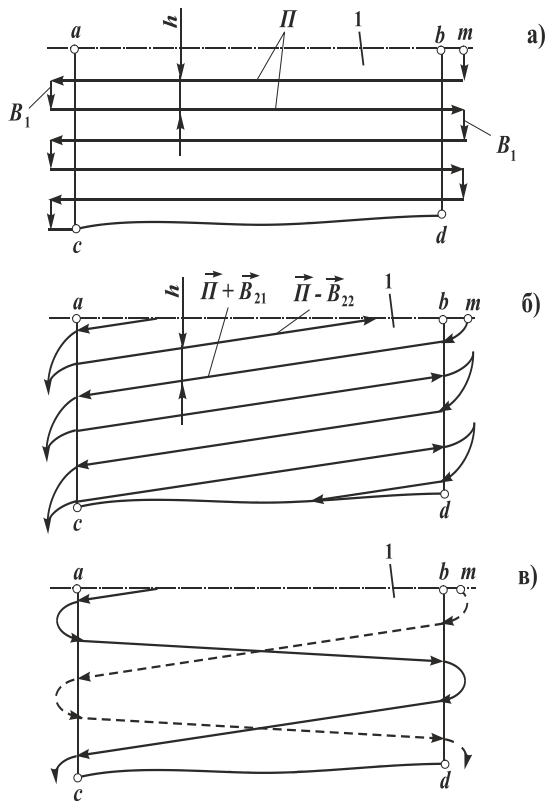


Рис. 14. Варианты схем трассирования инструмента относительно детали (развертка): а – движение B_1 периодически, движение Π возвратно-поступательное; б – движение B_2 возвратно-вращательное, движение Π возвратно-поступательное; в – движение B_3 постоянное вращательное, движение Π возвратно-поступательное

4. Для реализации ФОП на детали машин разработано специальное технологическое обеспечение.

5. В представленной работе исследованы особенности реализации функционально-ориентированных свойств деталей на основе ФОП. При этом установлено, что ФОП обеспечивают качественно новую совокупность свойств деталей машин.

Список литературы: 1. Пузряков А.Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления: Учеб. пособие по курсу «Технология конструкций из металлокомпозитов». – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 360 с. 2. Григорьев С.Н. Методы повышения стойкости режущего инструмента. – М.: Машиностроение, 2009. – 368 с. 3. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки // Г.Л. Амитан, И.А. Байсупов, Ю.М. Барон и др. – Л.: Машиностроение, 1988. – 719 с. 4. Ющенко К.А., Борисов Ю.С., Кузнецов В.Д., Корж В.М. Інженерія поверхні. Підручник. – К.: Наукова думка, 2007. – 558 с. 5. Михайлов А.Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с. 6. Михайлов Д.А., Недашковский А.П., Ивченко Т.Г. Технологические особенности восстановления лопаток компрессора ГТД с применением функционально-ориентированных покрытий / Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний зб. наукових праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2014. Вип. 1 (47). С. 213 - 224.

Заключение

Таким образом, в представленной работе выполнены исследования по повышению качества деталей машин на основе создания специальных свойств каждой поверхности детали и структуры свойств всей детали в условиях действия множества неравномерных эксплуатационных функций за счет обеспечения ФОП. Проведенные исследования позволили выполнить следующее.

1. Выполнен анализ особенностей разрушений функциональных элементов деталей при эксплуатации. При этом установлено, что в ряде случаев на детали машин действуют переменные эксплуатационные функции, которые приводят к снижению из ресурса.

2. В работе разработан общий подход по нанесению ФОП на поверхности деталей машин. Этот подход базируется на группе особых принципов реализации ФОП.

3. Для упорядочивания различных вариантов покрытий и свойств деталей разработана классификация ФОП.