

А. В. Костенко, канд. техн. наук, доц.

Камчатский государственный технический университет, Россия

Тел./Факс: +7 (984) 1637436; E-mail: andr13kost@list.ru

ОСОБЕННОСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ СВОЙСТВ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ЦИЛИНДРОВЫХ ВТУЛОК СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ

В статье рассмотрена проблема создания на внутренней поверхности цилиндрической втулки поверхностного слоя, имеющего переменные свойства в зависимости от действия эксплуатационных функций. Приведены и описаны этапы синтеза функционально-ориентированного технологического процесса создания покрытия втулки. Показаны функциональные элементы цилиндрической втулки по уровням деления глубины технологии. Приведен график, характеризующий характер и величину износа рабочей области внутренней поверхности цилиндрической втулки. Приведены схемы и математическое отображение однослойного и многослойного покрытий с переменными свойствами. Показано, что электроискровое легирование и ионно-плазменное напыление дают возможность реализовывать требуемые свойства поверхностного слоя на основе функционально-ориентированного подхода, что позволяет решить задачу создания судового дизеля с единым ресурсом его элементов.

Ключевые слова: судовый дизель, цилиндрическая втулка, ресурс, функционально-ориентированное покрытие, технологическое воздействие, функциональный элемент, электроискровое легирование, ионно-плазменное напыление.

A.V. Kostenko

FEATURES OF PROVIDING FUNCTIONALLY-ORIENTED PROPERTIES OF THE INNER SURFACE OF CYLINDER LINERS FOR MARINE DIESELS

The article deals with the problem of creating a coating on the inner surface of a cylinder liner that has variable properties depending on the action of operational functions. The stages of synthesis of a functionally oriented technological process of creating a sleeve coating are given and described. The functional elements of the cylinder sleeve are shown according to the levels of division of the depth of technology. A graph characterizing the nature and magnitude of wear of the working area of the inner surface of the cylinder liner is presented. Schemes and mathematical display of single-layer and multi-layer coatings with variable properties are presented. It is shown that electrospark alloying and ion-plasma spraying make it possible to implement the required properties of coatings on the basis of a functionally oriented approach, which makes it possible to solve the problem of creating a marine diesel engine with a single resource of its elements.

Keywords: marine diesel engine, cylinder liner, service life, functionally oriented coating, technological impact, functional element, electrospark alloying, ion-plasma spraying.

1. Введение

Цилиндрические втулки относятся к деталям, от которых существенно зависит ресурс всего судового дизеля. При этом втулки являются тяжелонагруженными деталями, так как одновременно подвергаются воздействию различных эксплуатационных функций. Такая особенность работы втулок приводит к тому, что различные ее части имеют не только различную природу эксплуатационных функций, но и различное время достижения предельного состояния, что является проблемой при создании изделий, имеющих равный ресурс его элементов.

Наиболее нагруженной частью втулки является внутренняя поверхность, являющаяся направляющей для поршня с поршневыми кольцами.

В процессе работы происходит неравномерное изнашивание внутренней поверхности втулки по длине образующей цилиндра, что оказывает влияние на долговечность и работоспособность двигателя. При этом возле верхней мертвой точки (ВМТ)

возникают самые неблагоприятные условия, сопровождающиеся высокой температурой (до 350°C) и давлением (до 16 МПа), а также минимальной толщиной масляной пленки. Это приводит к тому, что интенсивность изнашивания верхней части внутренней поверхности втулки будет выше.

Применение функционально-ориентированного подхода при создании поверхностных слоев с требуемыми параметрами позволяет на основе учета особенностей нагружения цилиндрических втулок разработать такие технологические воздействия, которые бы обеспечили равный ресурс всех функциональных элементов (ФЭ) втулки.

Процесс синтеза функционально-ориентированного технологического процесса создания необходимого поверхностного слоя втулки выполняется в три этапа: 1) анализ эксплуатационных особенностей втулки; 2) деление втулки на функциональные элементы по уровням глубины технологии, создание структуры ФЭ; 3) составление схем технологического воздействия, разработка операций и др.

Цель и задачи:

Цель статьи – обосновать методы создания поверхностного слоя для обеспечения функционально-ориентированных свойств внутренней поверхности цилиндрических втулок судовых дизелей.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ условий эксплуатации внутренней поверхности цилиндрических втулок судовых дизелей;
- выполнить деление втулки на функциональные элементы в соответствии с особенностями действия нагрузок при эксплуатации;
- обосновать методы создания функционально-ориентированных свойств внутренней поверхности цилиндрических втулок.

2. Основное содержание и результаты работы

В работах [1-3] и ряде других приводятся неисправности, изучение причин которых, а также выявление эксплуатационных функций является первым этапом.

В работе [2] втулка представлена рядом ФЭ на нескольких уровнях технологии. Рассмотрим деление втулки на функциональные элементы по уровням деления. Первый уровень соответствует уровню всей втулки, второй уровень – уровень частей втулки, третий – составляющие, четвертый – зоны. На рис. 1 показана втулка, ее части (наружная, внутренняя) и составляющие. На рис. 2 представлен граф функциональных элементов цилиндрической втулки по уровням деления, в частности показано, что на 2-м уровне внутренняя часть (01.01) делится на 4 составляющих (01.01.01, ..., 01.01.04), а наружная часть (01.02) втулки делится на 6 составляющих: 01.02.01, ..., 01.02.06.

Таким образом, получили ряд ФЭ, каждый из которых имеет свою целевую и служебные функции, а также отличается видом эксплуатационных функций, т.е. эксплуатационными воздействиями. На основе ФОТ необходимо подходить к созданию необходимых свойств каждого элемента, но на базе общего подхода, ставя целью создание единого ресурса всех элементов.

В рамках данной работы рассмотрим рабочую область внутренней части, заключенную между верхней и нижней мертвыми точками – составляющую 01.01.03 (см. рис. 1 и рис. 2). Эффективность работы дизеля будет зависеть от качества реализации рабочего цикла в цилиндре, что во многом зависит от качества поверхности втулки и характером взаимодействия этой поверхности с поршневыми кольцами.

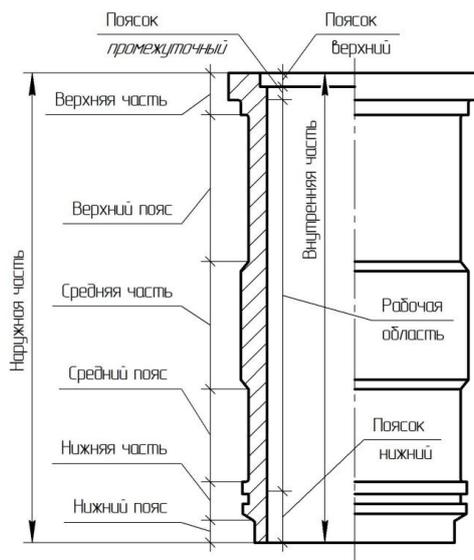


Рисунок 1. Функциональные элементы цилиндрической втулки по уровням деления

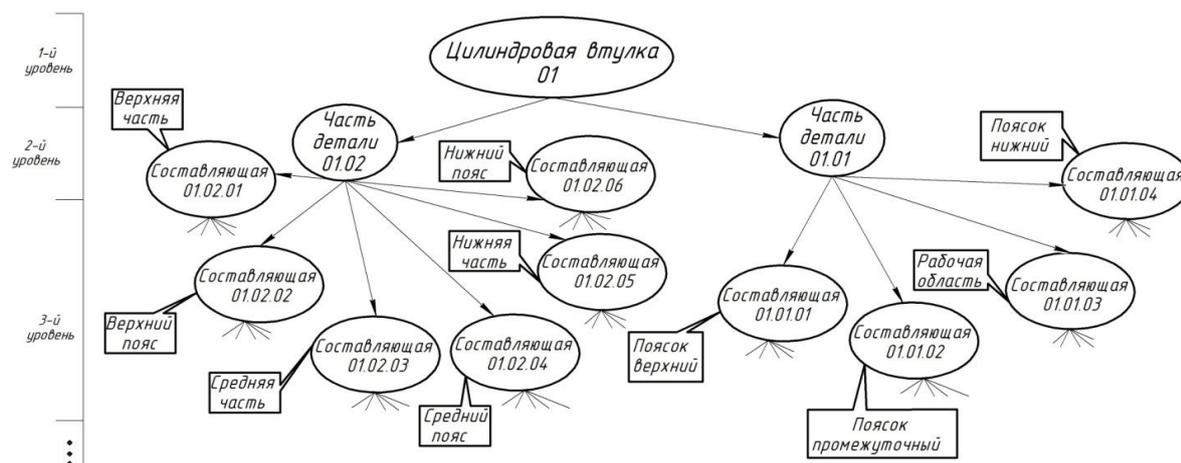


Рисунок 2. Граф функциональных элементов цилиндрической втулки по уровням деления

Внутренняя часть втулки подвергается воздействию высокой температуры, высоким удельным давлениям от поршневых колец, возникающей силой трения между кольцами и втулкой, все процессы усугубляются разрушением масляной пленки под воздействием температуры и механического воздействия.

Оказывая специфическое влияние, эксплуатационные функции приводят к эксплуатационным дефектам, среди которых следует выделить следующие [3]: возникновение усталостных микротрещин; деформация втулки; износы рабочей поверхности втулки (натиры на зеркале втулки, микрозадиры и микроизносы зеркала, неравномерный износ зеркала); выкрашивание азотированного слоя; ступенчатая выработка в зоне остановки верхнего поршневого кольца; кавитационный и коррозионный износ наружной поверхности втулки.

Износ рабочей поверхности втулки является основной неисправностью, которая возникает при эксплуатации дизеля. Изучив характер износа, можно определить требуемые параметры качества поверхностного слоя втулки. Очевидно, что максимальная величина износа будет наблюдаться в верхней части втулки из-за действия в этой части более высоких температур и давлений, а также прижатия поршневых колец к втулке с

большим усилием. При этом разрушение масляной пленки в этом месте приводит к интенсификации изнашивания.

На рис. 3 показан график, характеризующий характер и величину износа рабочей области внутренней поверхности цилиндровой втулки, функциональные элементы которой представлены на рис. 1.

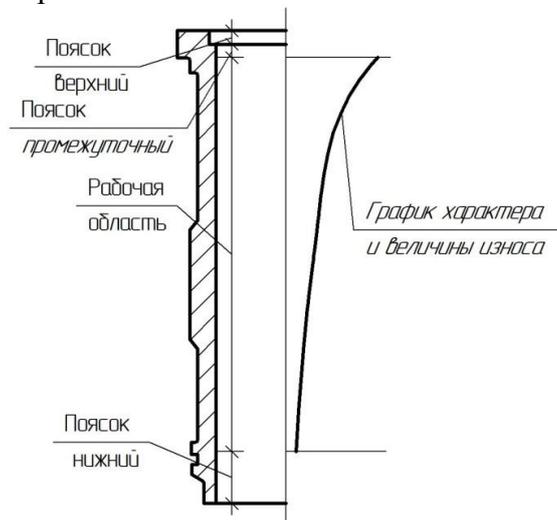


Рисунок 3. Характер и величину износа рабочей области внутренней поверхности цилиндровой втулки

Отметим, что изнашивание втулки происходит в двух плоскостях – по оси блока и в плоскости движения шатуна. Характер износа будет одинаковый, но для крейцкопфных дизелей износ по оси блока будет больше, в то время, как для бескрейцкопфных дизелей, как правило, износ в плоскости движения шатуна всегда больше, так как тронк их поршней выполняет роль ползуна. Скорость износа в верхней части в 4,5...5,5 раза больше, чем в средней [4].

Таким образом, чтобы обеспечить принцип единого ресурса при изготовлении цилиндровой втулки необходимо обеспечить равномерный износ рабочей области зеркала цилиндровой втулки с учетом неравномерности изнашивания.

ФОТ позволяют решать эту задачу, используя нанесение функционально-ориентированных покрытий (ФОП), представляющих собой специальные покрытия с функционально-ориентированными свойствами. В данном случае необходимо обеспечить свойства покрытия с учетом скорости износа. Очевидно что, так как износ переменный, то и свойства покрытия должны быть переменными.

В работе [5] приведена классификация ФОП, согласно которой различают однослойные, многослойные и комбинированные покрытия.

В связи с необходимостью выдерживания постоянного внутреннего диаметра втулки, который связан с диаметром поршня и размерами поршневых колец, для внутренней поверхности цилиндрических втулок интерес представляют однослойные покрытия с изменяющимися свойствами и многослойные покрытия.

На рис. 4 показаны варианты однослойного покрытия постоянной толщины и переменными свойствами (рис. 4, а) и многослойного покрытия со слоями постоянной толщины (рис. 4, б).

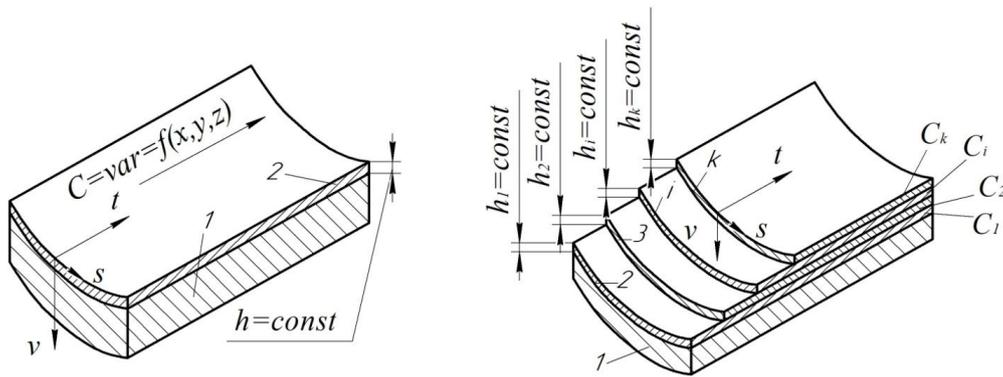


Рисунок 4. Варианты ФОП:

- a* – однослойное покрытие постоянной толщины и с переменными свойствами;
- б* – многослойное покрытие со слоями постоянной толщины;
- I* – основной материал втулки; 2, 3, *i*, ..., *k* – слои покрытия;
- C*, *C*₁, *C*₂, *C*_{*i*}, *C*_{*k*} – свойства слоев покрытий.

Представленные на рис. 4 покрытия реализуются посредством технологических воздействий (ТВ), за счет которых и реализуются необходимые свойства внутренней поверхности цилиндровой втулки. При реализации технологического процесса происходит преобразование входных параметров заготовки в выходные параметры изделия при выполнении ТВ [6]. При этом, входными параметрами будут параметры поверхностного слоя рабочей области ЦВ перед реализацией ФОП, выходными – параметры полученного ФОП.

Схемы ТВ являются важным этапом проектирования технологического процесса формирования поверхностного слоя зеркала цилиндрических втулок на основе функционально-ориентированного подхода:

$$TB \rightarrow \{M, E, I\} = \{(m_1, e_1, i_1), (m_2, e_2, i_2), \dots, (m_G, e_G, i_G)\},$$

где *M*, *E*, *I* – потоки ТВ материального, энергетического, информационного типа; (*m_k*, *e_k*, *i_k*) – кортеж материи *m*, энергии *e*, информации *i*; *G* – мощность множества ТВ.

Однослойное покрытие, представленное на рис. 4, а, относится к покрытию единовременнo-единовременному на глубине *v* (ЕЕ), т.е. наносится одновременно в направлениях *s* и *t* на глубину *v*. Математическое отображение процесса нанесения однослойного покрытия постоянной толщины и с переменными свойствами (рис. 4, а) имеет вид

$$TB^{EE} \rightarrow \left\{ (m_{s,t,v}, e_{s,t,v}, i_{s,t,v}), \left(\bigwedge_{s=1}^{\infty} dl_s \times \bigwedge_{t=1}^{\infty} dl_t \times dl_v \right) \right\}.$$

Одним из методов машиностроения, которые могут реализовать покрытие, представленное на рис. 4, а, является метод электроискрового легирования (ЭИЛ), который обладая рядом преимуществ (высокая прочность сцепления легированного слоя и материалы основы; возможность нанесения на упрочняемую поверхность различных токопроводящих, тугоплавких металлов и соединений; низкая энергоемкость процесса; простота технологической операции), позволяет создавать ФОП, реализуя в них требуемые свойства за счет решения следующих технологических задач [7]:

- варьирование в заданном направлении химическим и фазовым составом поверхности путем легирования металлами, интерметаллидами, соединениями, графитом с целью повышения коррозионной стойкости, износостойкости, изменения электросопротивления, эмиссионно-адсорбционных, теплофизических и других свойств;

– варьирование в заданном направлении микрокристаллической, макрокристаллической, наноструктурой приповерхностных слоев материалов.

Таким образом, ЭИЛ позволяет создать на внутренней поверхности втулки слой с переменными свойствами, обеспечивающими одинаковую интенсивность изнашивания рабочей области внутренней поверхности цилиндровой втулки. Например, реализовать поверхностный слой, твердость которого изменялась бы в соответствии с кривой износа – увеличивалась в верхней части втулки и уменьшалась к нижней части втулки, поскольку, как известно, сопротивление износу возрастает с увеличением твердости рабочей поверхности.

Отметим, что при использовании ЭИЛ может происходить значительное изменение твердости. При этом основными факторами, приводящими к изменению твердости, являются термосиловое воздействие импульсного разряда, закалочные явления, образование химических соединений (карбидов, нитридов, интерметаллидов), осаждение на поверхности катода материала анода [8]. Соответственно, варьируя параметрами ЭИЛ можно реализовать требуемое изменение твердости внутренней поверхности втулки, создавая слой с переменными свойствами. Используя различные металлы и их соединения дополнительно можно придать создаваемому слою термоустойчивость и коррозионную стойкость.

Многослойное покрытие, представленное на рис. 4, б, относится к покрытию единовременнo-единовременнoму прерывнoму (ЕЕП), т.е. наносится одновременно в направлениях s и t , а в направлении v прерывисто. Математическое отображение процесса нанесения многослойного покрытия со слоями постоянной толщины имеет вид

$$TB^{ЕЕП} \rightarrow \bigvee_{v=1}^r \left\{ (m_{s,t,v}, e_{s,t,v}, i_{s,t,v}), \left(\bigwedge_{s=1}^{\infty} dl_s \times \bigwedge_{t=1}^{\infty} dl_t \times dl_v \right) \right\}.$$

Многослойные ФОП внутренней поверхности втулки могут реализовываться на базе вакуумных ионно-плазменных покрытий. Вакуумные ионно-плазменные покрытия являются эффективными и относительно простыми для реализации. Метод позволяет наносить высокопрочные и износостойкие покрытия и обеспечивать заданные эксплуатационные свойства [5]. Использование технологии нанесения ионно-плазменных покрытий позволит сформировать на внутренней поверхности цилиндровой втулки многослойное покрытие с необходимым набором свойств.

В работе [5] толщина одного слоя ионно-плазменного многослойного покрытия составляла 2,4...6,5 мкм. В общем случае толщина λ одного слоя покрытия составляет не более 20 мкм; таким образом, толщина многослойного покрытия будет $\lambda^* = k \cdot \lambda$, где k – количество слоев покрытия.

Внутренний диаметр цилиндрических втулок выполняют с допуском $H7$, а для малооборотных дизелей – $H8$ и $H9$ [9]. Для втулок диаметром 80...120 мм поле допуска может составлять от 35 мкм ($H7$) до 87 мкм ($H9$), а для втулок диаметром 400...500 мм – от 63 мкм до 155 мкм. Приведенные поля допусков свидетельствуют о возможности создания многослойных покрытий на внутренней поверхности цилиндрических втулок. Т.е. толщина создаваемых функционально-ориентированных покрытий на внутренней поверхности втулок входит в поле допуска и не требует переналадки оборудования, используемого при изготовлении втулок. При этом во время эксплуатации будет происходить изнашивание покрытия, а не основного материала.

На основании приведенного в [10] структурного варианта операций ионно-плазменного напыления внутренней поверхности цилиндрической втулки в вакуумной ионно-плазменной установке представим технологический процесс в виде графа

$G = G(X, U)$, который задается непустым множеством элементов и множеством связей (рис. 5).

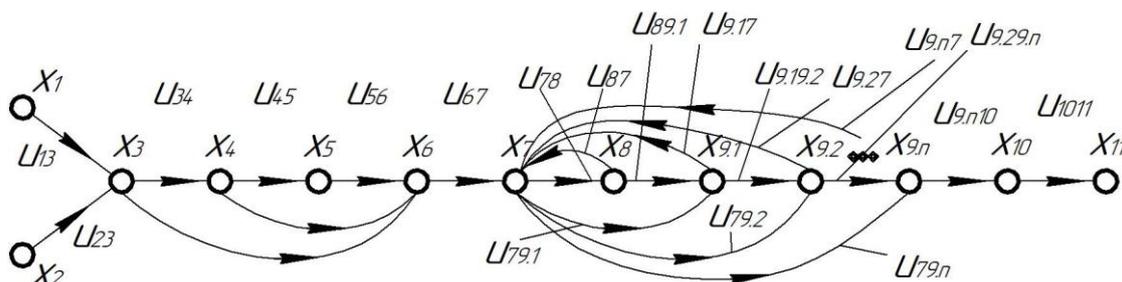


Рисунок 5. Граф ионно-плазменного напыления внутренней поверхности цилиндрической втулки в вакуумной ионно-плазменной установке:

x_1 – подготовка вакуумной камеры; x_2 – подготовка втулки; x_3 – размещение втулки в камере; x_4 – очистка поверхности втулки; x_5 – насыщение поверхностного слоя газами; x_6 – ионная бомбардировка поверхности; x_7 – прогрев поверхности втулки; x_8 – металлизация поверхности; $x_{9.1} \dots x_{9.n}$ – напыление i -го слоя; x_{10} – охлаждение втулки; x_{11} – разгрузка камеры.

Элементы являются вершинами и соответствуют операциям технологического процесса:

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}.$$

Связи изображаются в виде ребер графа и характеризуют взаимосвязи между операциями технологического процесса

$$U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}.$$

Поскольку направление связи в графе в нашем случае является существенным, то ребра являются ориентированными и называются дугами.

Для внутренней поверхности втулки, в общем случае, можно применять следующие слои покрытий:

1 – первый адгезионный слой – связующий – для лучшей связи основного материала втулки с последующим температурозащитным слоем. Данный слой компенсирует разность температурных коэффициентов расширения, улучшает адгезию.

2 – температурозащитный слой – жаростойкий – уменьшает проникновение температуры к основному материалу втулки.

3 – второй адгезионный слой – связующий – для лучшей связи температурозащитного слоя со следующим износостойким слоем.

4 – износостойкий слой (несколько слоев) – выполняет основную функцию функционально-ориентированного покрытия, которая заключается в обеспечении одинаковой интенсивности износа для рабочей внутренней поверхности втулки с учетом кривой износа. Это достигается за счет создания неравных свойств покрытия, т.е. повышения износостойкости покрытия с увеличением теплового и механического нагружения в соответствии с графиком характера и величины износа рабочей области внутренней поверхности цилиндрической втулки.

3. Заключение

Изготовление агрегатов, имеющих равный ресурс его элементов является актуальной задачей машиностроения, которую можно решить, используя функционально-ориентированную технологию. На основе такой технологии создаются функционально-

ориентированные покрытия, имеющие переменные свойства, зависящие от действия эксплуатационных функций.

Создание поверхностного слоя внутренней рабочей поверхности цилиндровой втулки с требуемыми параметрами на основе функционально-ориентированного подхода возможно, как показано в данной работе, с применением электроискрового легирования или нанесения ионно-плазменного покрытия.

Учитывая особенности нагружения рабочей поверхности, а также кривую интенсивности износа целесообразно создавать покрытие, имеющее сопротивление изнашиванию, возрастающего с увеличением нагрузки. Это даст возможность выровнять интенсивность изнашивания цилиндровой втулки в верхней и нижней части, что, в свою очередь, является шагом к созданию цилиндровой втулки с равным ресурсом ее функциональных элементов.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Возницкий, И. В. Повреждения и поломки дизелей. Примеры и анализ причин / И.В. Возницкий. – 2-е изд. перераб. – СПб.: Моркнига, 2006. – 116 с.
2. Костенко, А. В. Синтез структуры функционально-ориентированного процесса изготовления цилиндрических втулок на основе анализа работы судовых дизелей / А.В. Костенко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. – 2017. – Т. 9. – № 1. – С. 176-186.
3. Мясников, Ю. Н. Эксплуатационные дефекты судовых дизельных и газотурбинных двигателей / Ю.Н. Мясников, В.С. Никитин, А.А. Равин // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2018. – № 3 (385). – С. 85-96.
4. Маренков, Н. А. Обнаружение и устранение дефектов судовых дизелей / Н.А. Маренков. – М.: Транспорт, 1975. – 224 с.
5. Михайлов, Д. А. Технологическое обеспечение повышения работоспособности лопаток компрессора газотурбинного двигателя на основе функционально-ориентированных покрытий: дис. ... канд. техн. наук / Д.А. Михайлов; Донецк, 2016. – 275 с.
6. Михайлов, А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий / А. Н. Михайлов. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с.
7. Машков, Ю. К. Сущность метода электроискрового легирования / Ю.К. Машков, Д.Н. Коротаев, А.Е. Казанцева // Омский научный вестник. – 2007. – № 2 (56). – С. 94-95.
8. Электроискровое легирование металлических поверхностей / А.Е. Гитлевич, В.В. Михайлов, Н.Я. Парканский, В.М. Ревуцкий. – Кишинев: Штиинца, 1985. – 196 с.
9. Технология производства судовых энергетических установок / П.А. Дорошенко, А.Г. Рохлин, В.П.Булатов и др. – Л.: Судостроение, 1988. – 440 с.
10. Костенко, А.В. Особенности структуры функционально-ориентированной отделочно-упрочняющей обработки деталей судовых агрегатов / А.В. Костенко, А.Н. Михайлов, А.В. Лукичев // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2019. – №1 (64). – С. 43-51.

Поступила в редколлегию 18.01.2022 г.