

Технология и организация судостроения и судоремонта

Научная статья
УДК 621.793
<http://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-4/59-68>

Л.Б. Леонтьев, А.Л. Леонтьев

ЛЕОНТЬЕВ ЛЕВ БОРИСОВИЧ – д.т.н., профессор Политехнического института,
leontyev.l.b@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-8072-306X>

Дальневосточный федеральный университет

ЛЕОНТЬЕВ АНДРЕЙ ЛЬВОВИЧ – к.т.н., министр энергетики и газоснабжения,
gfi25leontev@mail.ru

Правительство Приморского края
Владивосток, Россия

Концепция конструктивно-технологического обеспечения долговечности триботехнических узлов судового оборудования

Аннотация. Целью работы является разработка концепции конструктивно-технологического обеспечения долговечности трибоузлов судового оборудования при восстановлении и упрочнении деталей сопряжения на основе системного подхода путем формирования оптимального комплекса параметров материала износостойкого покрытия. Разрабатываемая концепция конструктивно-технологического обеспечения долговечности триботехнических узлов судового оборудования, основанная на системном подходе, предлагает алгоритм решения проблемы и позволяет разрабатывать технологические процессы формирования покрытий, обеспечивающие заданный ресурс сопряжения при приемлемой экономической эффективности.

Ключевые слова: долговечность, технологический процесс, восстановление, упрочнение, трибоузел, судовое оборудование, системный подход

Для цитирования: Леонтьев Л.Б., Леонтьев А.Л. Концепция конструктивно-технологического обеспечения долговечности триботехнических узлов судового оборудования // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2022. № 4(53). С. 59–68.

Введение

Старение и уменьшение количества однотипного оборудования на вновь приобретаемых судах, как правило бывших в эксплуатации различными судовладельцами, делает проблему восстановления изношенных деталей и повышения их долговечности экономически целесообразной и весьма актуальной [5].

Эффективность технической эксплуатации судов морского и рыбопромыслового флотов в значительной степени зависит от долговечности и технического состояния главных и вспомогательных дизелей.

Опыт эксплуатации судовых дизелей показывает, что долговечность их использования до проведения ремонтов определяется параметрами технического состояния деталей цилиндропоршневой группы (ЦПГ) и подшипников коленчатого вала. Повышение ресурса данных трибоузлов для увеличения межремонтных периодов судовых дизелей является одной из важнейших проблем для технологов судоремонтных предприятий и научных сотрудников отрасли.

Износ даже одной детали сопряжения до величины, близкой к предельно-допустимой, требует перехода на ремонтный размер деталей сопряжения, то есть замены одной из деталей сопряжения для обеспечения нормативного зазора. Следует отметить, что детали ремонтного

размера имеют стоимость намного больше, чем детали номинального размера, и срок их поставки может достигать нескольких месяцев. Необходимо также учитывать, что в настоящее время доля стоимости иностранных комплектующих в структуре стоимости судового оборудования составляет для гражданского сектора от 40 до 85 % [10].

Несмотря на большой объем исследований в области повышения износостойкости, различными технологическими методами до сих пор не обеспечиваются потребности практики по созданию долговечных узлов трения вследствие многообразия механизмов изнашивания и большого числа факторов, влияющих на износ конкретного трибоузла [1–4, 7–9].

В связи с этим возникает проблема совершенствования управления технологическими процессами формирования параметров износостойких покрытий, которая заключается в создании условий наиболее полного и точного удовлетворения технических требований и показателей долговечности деталей при минимальных трудовых, материальных ресурсах и финансовых затратах, необходимых для восстановления или упрочнения деталей трибоузлов и эксплуатации отремонтированного судового оборудования. Достигается это путем оптимизации параметров технологических факторов процессов формирования износостойких покрытий. Показатели технико-экономической целесообразности являются ограничивающими условиями и определяют требования к формированию параметров покрытия в пределах допуска. Общий методологический подход к решению задачи формирования заданных эксплуатационных свойств можно сформулировать как достижение таких параметров материала покрытия деталей, которые обеспечили бы заданную долговечность при различных условиях работы сопряжения.

Цель статьи – разработка концепции конструктивно-технологического обеспечения долговечности трибоузлов судового оборудования при восстановлении и упрочнении деталей сопряжения на основе системного подхода путем формирования оптимального комплекса параметров материала износостойкого покрытия.

Термины и определения. Формирование параметров материала покрытия представляет собой совокупность последовательных, случайно распределенных воздействий, обеспечивающих получение заданных физико-механических, структурных, геометрических и других свойств деталей судового оборудования. Формирование параметров износостойкого покрытия включает в себя два процесса: конструктивно-технологическое формирование параметров покрытия (КТФПП) и эксплуатационное формирование параметров (ЭФП), причем эксплуатационные параметры в значительной степени определяются конструктивно-технологическими.

Под процессом *восстановления деталей формированием износостойкого покрытия* понимается нанесение слоя толщиной, необходимой для получения номинального размера детали согласно рабочему чертежу.

Под процессом *упрочнения деталей формированием износостойкого покрытия* понимается получение тонкопленочного слоя, при котором размер детали находится в пределах допуска.

Критериальный параметр – это параметр, изменение которого ограничивает долговечность детали или узла под воздействием эксплуатационных факторов.

Методология системного проектирования технологических процессов восстановления и упрочнения деталей

Формирование параметров износостойкого покрытия восстанавливаемых и упрочняемых деталей базируется на исследовании взаимосвязей между элементами системы «технология–износостойкое покрытие–условия эксплуатации» (ТПЭ), декомпозиции, анализа, минимизации, синтезе, то есть проблема повышения долговечности трибоузлов может быть решена при использовании системного подхода. Системный подход предполагает учет всех этих взаимосвязей, анализ отдельных частей системы ТПЭ как ее самостоятельных структурных составляющих, а также определение влияния каждой из них в функционировании всей системы в целом (рис. 1).

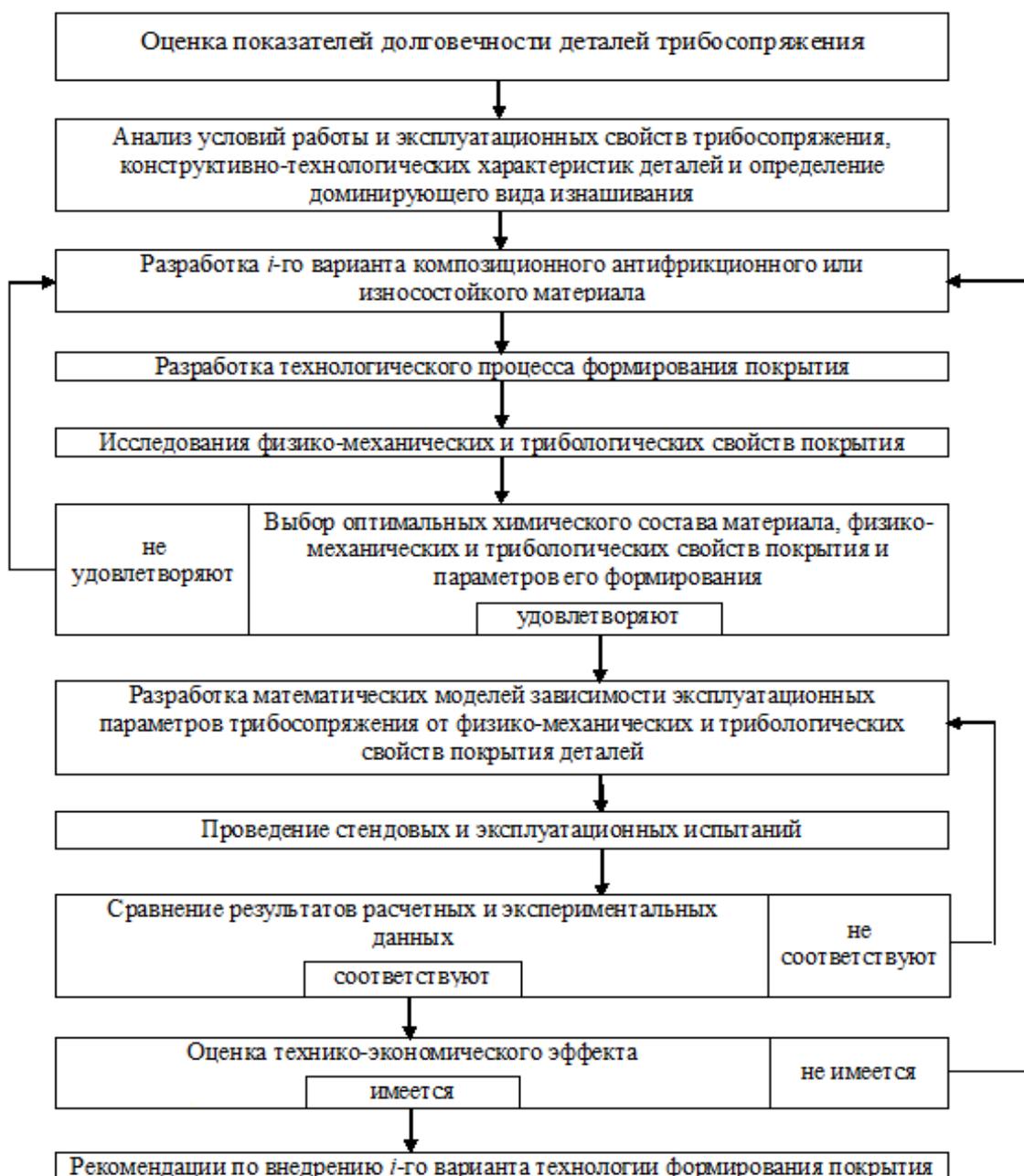


Рис. 1. Концептуальная блок-схема обеспечения заданной долговечности узла трения путем проектирования конструктивно-технологического процесса формирования износостойкого или антифрикционного покрытия

Следует отметить, что основные исследования триботехнических свойств пары трения выполняются на машинах трения, которые не позволяют полностью моделировать эксплуатационные условия в конкретном сопряжении, что оказывает существенное влияние на достоверность результатов испытаний, поэтому кроме лабораторных испытаний необходимо проводить стендовые и натурные исследования оборудования для уточнения результатов модельных испытаний (см. рис. 1).

Методология системного анализа системы ТПЭ состоит из нескольких этапов [6], причем на первом этапе выполняется анализ факторов, влияющих на долговечность деталей триботехнического узла, так как скорость изнашивания деталей зависит не только от их конструктивно-технологических особенностей, формирующих качество и необходимые эксплуатационные свойства поверхностного слоя детали при трении, но и от условий работы деталей, а также от эксплуатационных свойств сопряжения и изменений характеристик поверхностных слоев в процессе эксплуатации (рис. 2).



Рис. 2. Блок-схема анализа факторов, влияющих на долговечность узла трения

В процессе эксплуатации оборудования и, соответственно, трибосопряжения в зоне контакта происходят не только механические, но и физико-химические процессы. В зоне контакта сопряжения выделяется тепло, изменяются микроструктура и топография поверхностей, образуются новые вещества. В этом активно участвуют окружающая среда, смазка и содержащиеся в ней продукты износа. При постоянных внешних условиях трения и вида контактирования структурные факторы и физико-механические свойства поверхностного слоя в значительной степени определяют триботехнические характеристики сопряжения. Следовательно, наиболее перспективными объектами управления для обеспечения заданной долговечности сопряжения являются химический состав и структура износостойкого покрытия, которые определяют физико-механические и, соответственно, триботехнические характеристики пары трения в условиях трения при граничной смазке.

Проблему конструктивно-технологического обеспечения долговечности триботехнических узлов можно разбить на три взаимосвязанных этапа (рис. 3) [5, 6]:

- 1) проектирование технологического процесса восстановления или упрочнения детали сопряжения и его практическую реализацию;
- 2) эксплуатация трибоузла с восстановленной или упрочненной деталью и оценка его долговечности;
- 3) совершенствование технологии и организации технологического процесса восстановления или упрочнения деталей по результатам подконтрольной эксплуатации трибоузла в составе оборудования в целях повышения долговечности, если ресурс недостаточен.

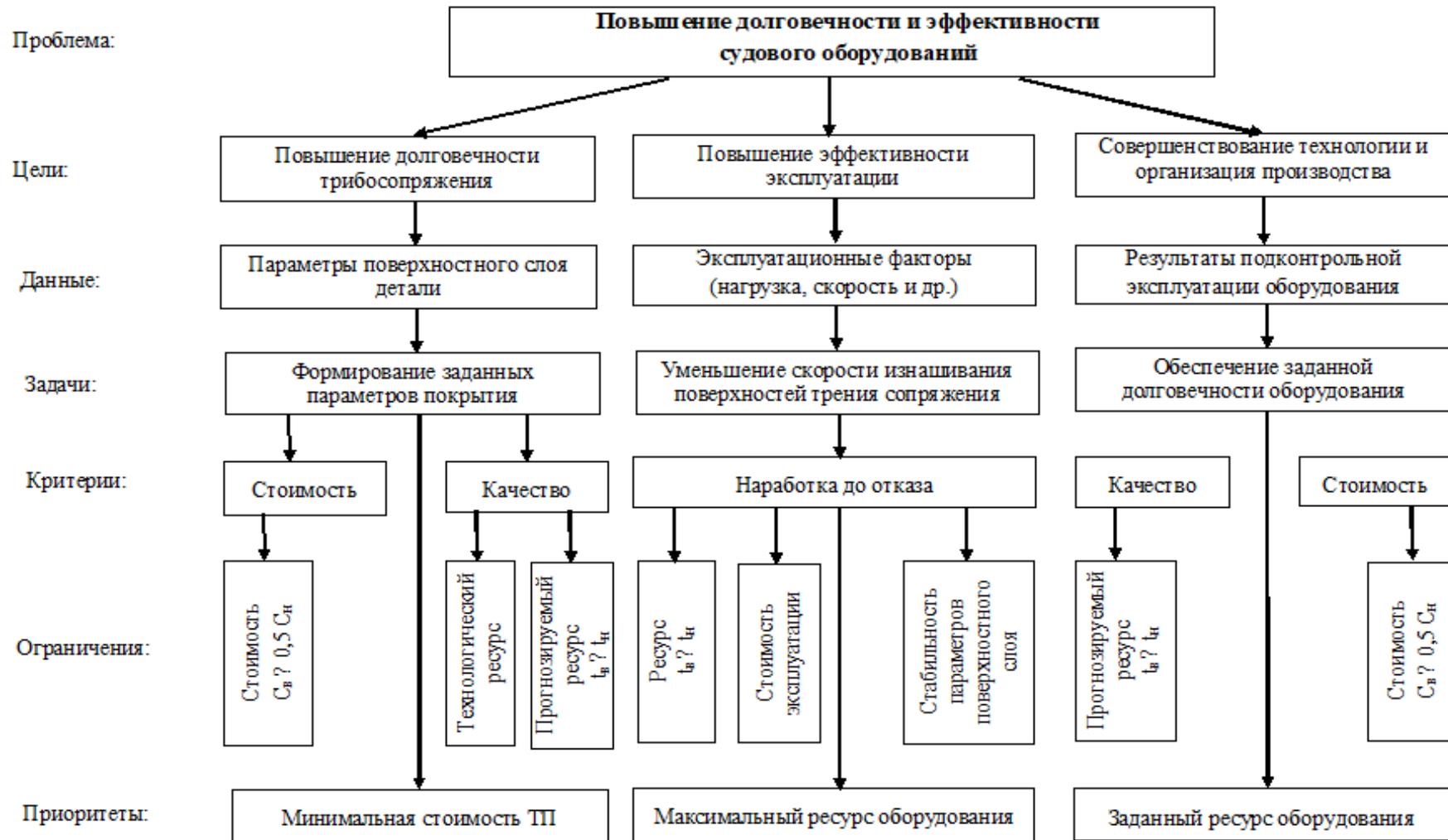


Рис. 3. Структура этапов, целей и задач, решаемых при конструктивно-технологическом обеспечении долговечности триботехнических узлов судовых дизелей

Следует отметить, что выпускаемое судовое оборудование постоянно модернизируется в целях увеличения его мощности, производительности, снижения массы и габаритов, в результате чего возрастают механические и тепловые нагрузки на поверхности деталей, снижается их ресурс. Поэтому для обеспечения требуемой долговечности трибоузла при проектировании технологического процесса формирования покрытия приходится применять или разрабатывать новые материалы, в наибольшей степени удовлетворяющие условиям эксплуатации, осваивать и внедрять перспективные методы нанесения покрытий или поверхностного упрочнения.

Эксплуатационные, или служебные, свойства трибоузла проявляются в процессе работы оборудования, которые можно оценить коэффициентом трения, износостойкостью, нагрузкой схватывания и т.д.

Уровень разработанной технологии оценивается стоимостью, технологичностью продукции и прогнозируемым ресурсом восстановленной детали.

В целом задачи, решаемые при разработке технологического процесса (рис. 3), имеют ограничения, которые учитывают требования, предъявляемые со стороны как технологии, так и эксплуатации. Конструктивно-технологическое обеспечение долговечности триботехнических узлов судовых дизелей – это весьма сложная система с многоуровневой иерархической структурой. На каждом уровне системы устанавливаются критерии эффективности функционирования и решаются задачи оптимизации

Интересы эксплуатации учитываются посредством технологического обеспечения назначенного ресурса, который может быть достигнут за счет применения при восстановлении или упрочнении современных технологии и материалов, обеспечивающих получение более высоких эксплуатационных свойств детали посредством увеличения триботехнических, механических и тому подобных свойств поверхностного слоя и других характеристик детали или отдельных ее элементов. При этом восстановленная деталь не должна увеличивать величину эксплуатационных расходов на оборудование, в которое она входит.

Исходя из целей, стоящих перед системой конструктивно-технологического обеспечения заданной долговечности триботехнических узлов судового оборудования путем формирования износостойкого покрытия на поверхностях трения деталей (рис. 4), особенностей ее функционирования, взаимозависимости и взаимодействия физико-механических и триботехнических свойств, а также условий работы и влияния их на долговечность трибосопряжения, учета таких принципов декомпозиции общей задачи, как получение необходимых промежуточных результатов и возможности реализации общего оптимума через совокупность локальных оптимумов, сформулирован следующий комплекс оптимизационных задач: оптимизация физико-механических и триботехнических свойств покрытия; обоснование условий работы факторов КТФПП и ЭФП, оптимизация параметров режима формирования покрытия, оптимизация показателей долговечности.

После анализа эксплуатационных факторов, действующих на поверхность детали, и определения доминирующего вида изнашивания выбирается способ формирования покрытия (методы нанесения покрытия, последующей механической обработки или упрочнения и т.п.) и материала. Важным условием оптимального выбора способа формирования износостойких и антифрикционных покрытий является определение факторов, существенно влияющих на износостойкость материалов поверхностных слоев сопряженных деталей. Интенсивность изнашивания деталей зависит как от технологии формирования покрытия, обеспечивающей необходимые эксплуатационные свойства поверхностного слоя детали при трении, так и от условий ее работы.

Выбор перспективных технологического метода и присадочного материала для формирования покрытия обеспечивает новое состояние объекта обработки в некотором диапазоне его геометрических, точностных, качественных и других характеристик.

Опыт разработки технологических процессов восстановления показывает, что следует существенно дополнить перечень функций по уровням проектирования благодаря включению в него выбора материала и метода формирования покрытия, оптимизации технологических параметров нанесения покрытия и режимов упрочняющей или механической обработки, технологического нормирования и др.

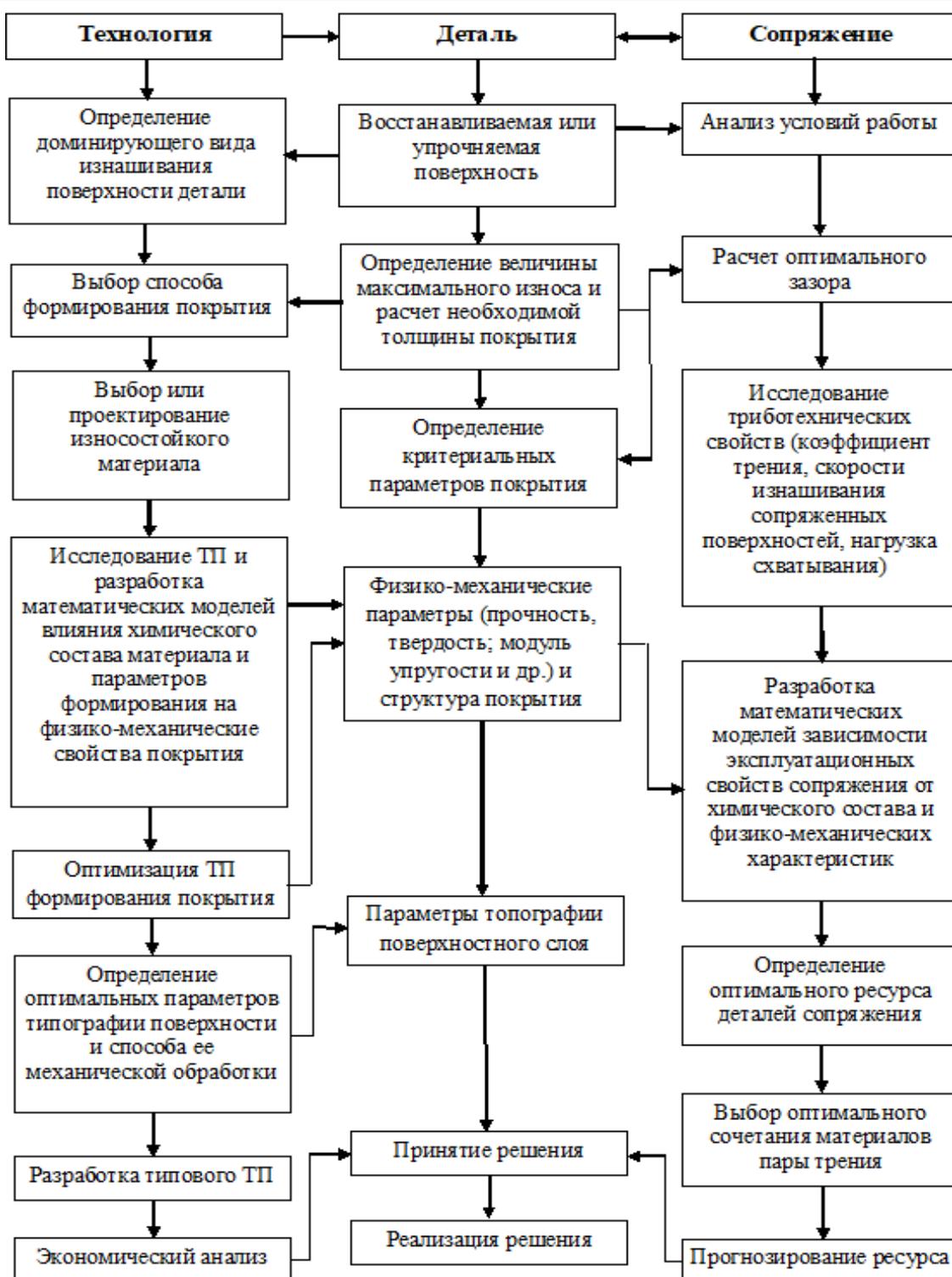


Рис. 4. Блок-схема конструктивно-технологического обеспечения заданной долговечности узлов трения путем формирования износостойкого покрытия

Наиболее трудоемким этапом разработки технологического процесса является определение параметров режима, которые позволяют получить оптимальные свойства поверхностного слоя детали при формировании покрытий. Следует отметить, что в настоящее время практически отсутствует методология разработки и выбора критериальных параметров поверхностного слоя деталей сопряжения и оптимальных параметров режима формирования покрытий вследствие воздействия на параметры поверхностного слоя детали различных эксплуатационных факторов и разнообразных физико-химических явлений.

Сложность описания таких воздействий определяется тем, что сам процесс формирования относится к разряду многофакторных. Для некоторых экспериментальных данных трудно установить корреляционную связь между входными и выходными параметрами, а многие из полученных аналитических уравнений носят нелинейный и трансцендентный характер. Это ведет, в свою очередь, к тому, что целевая функция эксплуатационных параметров не поддается в общем случае аналитическому описанию.

Задача выбора режимов формирования свойств материала для деталей значительно усложняется, когда имеется несколько параметров оптимизации, определяющих работоспособность и долговечность всей системы (например, изно- и коррозионная стойкость, жаропрочность и т.д.), то есть необходимо выполнить многокритериальную оптимизацию. Эта сложность проявляется еще и в том, что многие параметры оказывают влияние на долговечность не только сами, но и в комбинации с другими параметрами оптимизации. Поэтому необходим главный или обобщающий критерий оптимизации, по которому можно было бы однозначно оценивать правильность выбора оптимальной области параметров режима формирования свойств материала на стадии проектирования технологического процесса. Долговечность большинства деталей судового оборудования определяется их износостойкостью, поэтому в качестве обобщающего или главного параметра оптимизации можно выбрать показатели износостойкости детали, определяющие ресурс сопряжения или суммарную скорость изнашивания деталей трибоузла, так как они зависят от химического состава, физико-механических и структурных свойств поверхностного слоя, которые, в свою очередь, зависят от набора входных технологических параметров технологического процесса формирования покрытия (состава присадочного материала, способа формирования покрытия и т.д.). Для обеспечения требуемой износостойкости необходимо определить степень влияния химического состава, основных физико-механических и структурных свойств поверхностного слоя на данные отклики. Для этого необходимо построить многоуровневую модель, у которой обобщающий параметр будет функцией откликов, то есть

$$Z = f(y_1, y_2, \dots, y_n), \quad (1)$$

где $y_1 = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$; $y_2 = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$; ... $y_n = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ – отклики (физико-механические и структурные свойства поверхностного слоя), зависящие от набора входных технологических параметров процесса.

Для получения таких зависимостей более всего подходит методика регрессионного анализа, позволяющая получать зависимости как линейного, так и показательного (экспоненциального) типа. Например, износостойкость напыленных материалов зависит от коэффициента трения, нагрузки схватывания, адгезионной и когезионной прочности покрытия, которые, в свою очередь, являются функциями технологических параметров напыления. Таким образом, имея зависимости (1) и $y_1 = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$; $y_2 = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$; ... $y_n = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, можно управлять процессом формирования свойств поверхности таким образом, чтобы обеспечить требуемую долговечность (износостойкость) трибоузла.

Заключительным этапом перед принятием решения о реализации разработки являются экономический анализ разработанной технологии и определение прогнозируемого ресурса детали и узла в целом. Экономический анализ осуществляют на основе себестоимости продукции, произведенной по разработанной технологии. Прогнозирование ресурса трибосопряжения в первом приближении выполняется на основе сравнительных лабораторных или стендовых испытаний старого и нового технологических решений. Ресурс натуральных трибоузлов, поступающих на восстановление или упрочнение, известен. Зная скорости изнашивания деталей трибоузлов старого и нового технологических решений при лабораторных испытаниях, легко определить прогнозируемый ресурс восстановленной или упрочненной детали и, соответственно, трибосопряжения в целом.

Критериями при оценке разработанной технологии являются ее стоимость и получаемое качество детали (прогнозируемый ресурс).

Важным моментом при разработке технологического процесса является выбор базы: наиболее корректной базой следует считать поверхность детали, которая не подверглась изнашиванию при эксплуатации и не подлежит механической обработке в процессе восстановления.

Выводы

Таким образом, разработанная концепция конструктивно-технологического обеспечения долговечности триботехнических узлов судового оборудования, основанная на системном подходе, предлагает алгоритм решения проблемы и позволяет разрабатывать технологические процессы формирования покрытий, обеспечивающие заданный ресурс сопряжения при приемлемой экономической эффективности.

Заявленный вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Авдеевский В.С., Броневец М.А., Буше Н.А. Трибология и триботехника // Проблемы машиностроения и надежности машин. 1996. № 4. С. 3–13.
2. Березовский Б.А., Барышников Ю.М., Борзенко В.И., Кемпнер Л.М. Многокритериальная оптимизация: Математические аспекты. Москва: Наука, 1989. 128 с.
3. Дроздов Ю.Н. Преодоление трибологического барьера – проблема повышения ресурса технических систем // Вестник машиностроения. 1996. № 11. С. 3–7.
4. Замятин Ю.П., Замятина Л.А., Замятин А.Ю. Разработка научных основ и инженерных методов обеспечения надежности транспортных триботехнических систем // Трение и износ. 1996. Т. 17, № 2. С. 255–258.
5. Леонтьев Л.Б. Технологическое обеспечение надежности судового оборудования. Владивосток: Морской государственный университет, 2009. 544 с.
6. Леонтьев Л.Б., Леонтьев А.Л. Системное проектирование технологического процесса формирования износостойких покрытий // Металлообработка. 2012. № 1(67). С. 44–49.
7. Мышкин Н.К., Петроковец М.И. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии. Москва: Физматлит, 2007. 368 с.
8. Погодаев Л.И., Кузьмин В.Н., Дудко П.П. Повышение надежности трибосопряжений. Санкт-Петербург: Академия транспорта РФ, 2001. 303 с.
9. Погодаев Л.И., Кузьмин А.А. Структурно-энергетические модели надежности материалов и деталей машин. Санкт-Петербург: Академия транспорта РФ, 2006. 608 с.
10. Стратегия развития судостроительной промышленности на период до 2035 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 28 октября 2019 г. № 2553-р.

Original article

<http://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-4/59-68>

Leontyev L., Leontyev A.

LEV B. LEONTYEV, Doctor of Engineering Sciences, Professor, leontyev.l.b@yandex.ru,<http://orcid.org/0000-0002-8072-306X>*Far Eastern Federal University*ANDREY L. LEONTYEV, Candidate of Engineering Sciences, Minister of Energy and Gas Supply, gfi25leontev@mail.ru*Government of the Primorsky Territory*

Vladivostok, Russia

The concept of constructive and technological support durability of tribological units of ship equipment

Abstract. The aging of marine vessels and the difficulty in acquiring replacement parts for equipment makes the problem of restoring worn parts and increasing their durability economically feasible and very relevant. The main causes of part failures in most cases are various types of wear of friction surfaces. However, the lack of advanced technological processes for the restoration of worn parts and the methodology for their development in the system "technology - wear-resistant coating - operating conditions" to ensure their specified durability do not allow ensuring the efficiency of the equipment. To achieve the durability of tribological components of ship equipment, we have developed a methodology for designing technological processes based on a systematic approach, which offers an algorithm for solving the problem and allows us to develop technological processes for the formation of coatings that provide a given resource with acceptable economic efficiency.

Keywords: durability, technological process, restoration, hardening, tribological component, ship equipment, system approach

For citation: Leontyev L., Leontyev A. The concept of constructive and technological support durability of tribological units of ship equipment. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2022;(4):59–68. (In Russ.).

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflict of interests.

REFERENCES

1. Avduevskii V.S., Bronovets M.A., Bushe N.A. Tribology and tribotechnics. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*. 1996;(4):3–13. (In Russ.).
2. Berezovskii B.A., Baryshnikov Yu.M., Borzenko V.I., Kempner L.M. Multiobjective optimization: Mathematical aspects. Moscow, Nauka, 1989. 128 p. (In Russ.).
3. Drozdov Yu.N. Overcoming the tribological barrier – the problem of using technical systems. *Vestnik mashinostroeniya*. 1996;(11):3–7. (In Russ.).
4. Zamyatin Yu.P., Zamyatina L.A., Zamyatin A.Yu. Development of scientific bases and engineering methods of reliability of high reliability of tribological systems. *Trenie i iznos*. 1996;17(2):255–258. (In Russ.).
5. Leont'ev L.B. Technological support of ship equipment reliability. Vladivostok, Nevelskoy MSU, 2009. 544 p. (In Russ.).
6. Leont'ev L.B., Leont'ev A.L. System design of the technological process for the formation of wear-resistant coatings. *Metalloobrabotka*. 2012;(67):44–49. (In Russ.).
7. Myshkin N.K., Petrokovets M.I. Friction, lubrication, wear. Physical foundations and technical applications of tribology. Moscow, Fizmatlish, 2007. 368 p. (In Russ.).
8. Pogodaev L.I., Kuz'min V.N., Dudko P.P. Increasing the reliability of tribocouples. St. Petersburg, Akademiya transporta RF, 2001. 303 p. (In Russ.).
9. Pogodaev L.I., Kuz'min A.A. Structural and energy models of metals and machine parts. St. Petersburg, Akademiya transporta RF, 2006. 608 p. (In Russ.).
10. Strategy for the development of the shipbuilding industry for the period up to 2035. Approved by the Federal District of the Russian Federation dated October 28, 2019. № 2553-р. (In Russ.).