

271 РІЧКОВИЙ ТА МОРСЬКИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 621.413.3.436

DOI: 10.31498/2225-6733.51.2025.344957

МЕТОДИКА ПРОЕКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВІДНОВЛЕННЯ РОЗПОДІЛЬНИХ ВАЛІВ СУДНОВИХ ДВИГУНІВ ЗНОСОСТІЙКИМИ ПОКРИТТЯМИ

Агєєв М.С.	д-р техн. наук, професор, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5691-8986 , e-mail: maxageev73-73@ukr.net ;
Дзигар А.К.	ст. викладач, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5947-6263 , e-mail: anatoliidzygar@gmail.com ;
Устінцев С.М.	аспірант, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4352-9479 , e-mail: sustincev@gmail.com

Однією з задач формування багатофункціональних покриттів для забезпечення заданого ресурсу вузлів тертя можна вважати врахування поведінки взаємозалежних параметрів системи «технологія відновлення – деталь – експлуатація». Випадкові зміни технологічних та експлуатаційних факторів ускладнюють оцінку параметрів матеріалу в процесі формування зносостійкого покриття та його вибір і не надає можливості внести коректування, а також врахувати структурні зміни в поверхневому шарі матеріалу в процесі технічної експлуатації. Останнім часом вирішення питання підвищення експлуатаційних властивостей вузлів тертя все тісніше пов'язують з розвитком способів нанесення зносостійких покриттів в процесі відновлювального ремонту. Вибір зносостійких покриттів проводиться за таким основним показником, як величина зносу [1]. Проте, одного лише цього аспекту недостатньо для оптимального визначення матеріалу та методу створення захисного покриття для деталей, що піддаються тертю. Важливо враховувати конструкційні та технологічні потреби, що виникають в процесі використання в цілому [2]. В статті представлена методика проектування технологічного процесу відновлення зношених поверхонь вузлів тертя. Може використовуватися як типова для складових технологічного процесу формування зносостійких покриттів, що забезпечує взаємодію між факторами, які характеризують технологічний процес, а також для виявлення керованих факторів. Об'єктом проектування є технологічний процес відновлення розподільного валу суднового двигуна шляхом нанесення багатофункціональних покриттів в процесі ремонту, що забезпечує заданий ресурс.

Ключові слова: технологічний процес, проектування, розподільний вал, технологічні параметри, експлуатаційні параметри, зносостійкі покриття, ремонт, ресурс.

Постановка проблеми

Задача проектування технологічного процесу відновлення зношених поверхонь розподільних валів суднових двигунів шляхом нанесення зносостійких покриттів – складна практична задача. Вирішення практичної задачі відновлення та одночасно зміцнення пошкоджених поверхонь розподільних валів суднових двигунів може здійснюватися як застосуванням вже існуючих технологій відновлення та зміцнення, так і за рахунок їхнього удосконалення та проектуванням нових технологічних процесів.

Завдання ускладнюється у зв'язку з неоднаковістю і мінливістю умов експлуатації і, відповідно, швидкостей зношування шийок розподільних валів. Частина валів відмовляє до настання планових термінів чергових технічних обслуговувань та ремонтів, що призводить до вимушених простоїв суден і появи непланових робіт.

Відсутність єдиного, всеохоплюючого способу нанесення покриттів зумовлена тим, що кожен метод має свої обмеження та переваги. У певних умовах експлуатації певний метод може виявитися ефективним, тоді як в інших – ні. Кожен спосіб нанесення покриття

має свою специфічну сферу застосування. Крім того, один і той же матеріал може бути нанесений на поверхню різними способами. Зрештою, багато методів нанесення покриттів є взаємозамінними, що розширює можливості вибору оптимального рішення [3]. За допомогою нанесення захисних шарів неможливо досягти одночасного покращення абсолютно всіх характеристик виробу в будь-яких умовах використання. Навіть ідентичний матеріал, використаний для покриття, може демонструвати відмінності у своїх властивостях, залежно від застосованої технології нанесення. Зважаючи на широке різноманіття доступних методів створення зносостійких покриттів, постає задача вибору найбільш ефективного способу відновлення та покращення функціональних характеристик розподільних валів для забезпечення необхідного терміну служби [4].

Методика визначає найкращі технологічні послідовності для відновлення та зміцнення поверхні розподільних валів, що забезпечують максимальні експлуатаційні характеристики деталей за умови мінімізації витрат на їх ремонт.

При цьому конструювання системи типу «технологія зміцнення – розподільний вал – експлуатація»

ґрунтується не лише на зіставленні характеристик цієї системи з умовами її експлуатації, але й на співвідношенні властивостей покриття з характеристиками матеріалу розподільного валу.

Побудова нової методологічної схеми нанесення зносостійких покриттів, що дає змогу ефективно оптимізувати технологічні процеси створення зносостійких покриттів, враховуючи критерії їхньої експлуатаційної міцності, довговічності, цілісності структури, суцільності матеріалу і втомної міцності, є дуже актуальною науковою проблемою.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

У роботах [5, 6] автори рекомендують використання системного аналізу при розробці технологічних процесів. Це дає змогу впорядкувати всю початкову інформацію та визначити основні напрями для отримання оптимальних рішень. Системний підхід передбачає застосування комплексу методів, які дозволяють аналізувати складні об'єкти як єдине ціле, оцінювати різноманітні альтернативи (варіанти), кожна з яких характеризується широким набором змінних, а також забезпечувати повноту розгляду кожної альтернативи. Система може сприйматися як сукупність взаємопов'язаних елементів, що мають визначену структуру та допускають утворення ієрархії [5].

Згідно з дослідженням [7], автори наголошують на важливості впровадження методів управління стратегією на визначених етапах проектування технологічного процесу зміцнення шийок розподільних валів. Основною метою при цьому є забезпечення максимальної лінеаризації процесу проектування, що включає інтеграцію паралельних етапів і мінімізацію циклічності, особливо на високих рівнях проектування. Проте обмежена доступність необхідної інформації може ускладнювати реалізацію лінійної стратегії. У зв'язку з цим рекомендується здійснювати поділ процесу проектування на окремі задачі для поліпшення його структурованості й ефективності [7].

Під час розробки технологічного процесу нанесення зносостійких покриттів і підвищення експлуатаційних характеристик розподільних валів важливо обрати метод, який забезпечить максимальний строк служби деталі та мінімальну її собівартість [8]. При цьому необхідно враховувати ключові умови для створення якісних покриттів: вплив матеріалу деталі на склад покриття повинен бути мінімальним, а термічне навантаження на деталь – якомога нижчим [8].

Систему «технологія відновлення – розподільний вал – експлуатація» слід розглядати як єдину конструкцію, оскільки існує різниця між властивостями матеріалів деталі і нанесеного покриття. На місці контакту між покриттям і відновлюваною поверхнею деталі формується перехідна зона. Вибір матеріалу покриття здійснюється з урахуванням матеріалу самої деталі та умов її експлуатації. Метод нанесення покриття визначається робочою температурою компонентів покриття

та геометричними характеристиками виробу [8].

Спираючись на результати проведеного аналізу можна зробити висновок, що розробка уніфікованої методики з проектування технологічного процесу зміцнення вузлів тертя допоможе вирішити проблему нанесення багатофункціональних покриттів на типові деталі. Уніфікована методика надасть змогу враховувати при проектуванні взаємозв'язок технологічних та експлуатаційних факторів, що, в свою чергу, забезпечить заданий ресурс відновлюваної деталі.

Мета статті

Розробка науково-практичного апарату, який дозволяє проектувати технологію відновлення та зміцнення шийок розподільних валів судових двигунів, що забезпечує задану довговічність за прийнятною вартості.

Виклад основного матеріалу

У системі «технологія відновлення – розподільний вал – експлуатація» розподільний вал являє собою об'єкт дослідження з наступними блоками: вхідні параметри, процеси, вихідні параметри. В нашій роботі запропоновано розділити вхідні параметри на технологічні, експлуатаційні та перешкоди (рис. 1). Такий поділ дозволяє в явному вигляді виділити вплив технологічних параметрів на елементи вузла тертя. Вхідні експлуатаційні параметри системи утворюють блок, що характеризується за допомогою параметрів руху та прикладених до вузла тертя сил.

Функція системи, представлена на рис. 1, полягає у перетворенні вхідних параметрів у вихідні параметри:

$$\{P_m, F_e, V\} \xrightarrow{t} \{Q, N\},$$

де P_m – технологічні параметри; F_e – експлуатаційні параметри; V – перешкоди; t – час експлуатації; Q – вихідні параметри; N – втрати

Вхідні параметри:

Технологічні параметри: твердість, межа міцності (плинності) та модуль пружності покриття, структура зносостійкого покриття, початковий масляний зазор між шийкою та вкладишем, величина зносу.

Експлуатаційні параметри: характеристика масла (хімічний склад, динамічна в'язкість, наявність механічних домішок тощо), режим мащення, частота обертання тощо.

Перешкоди: перевантаження двигуна, несправності інших вузлів (заїдання поршневих кілець, несправність форсунок може побічно впливати на роботу розподільного валу).

Вихідні параметри:

Показники довговічності;

Інтенсивність зношування;

Мінімальна вартість.

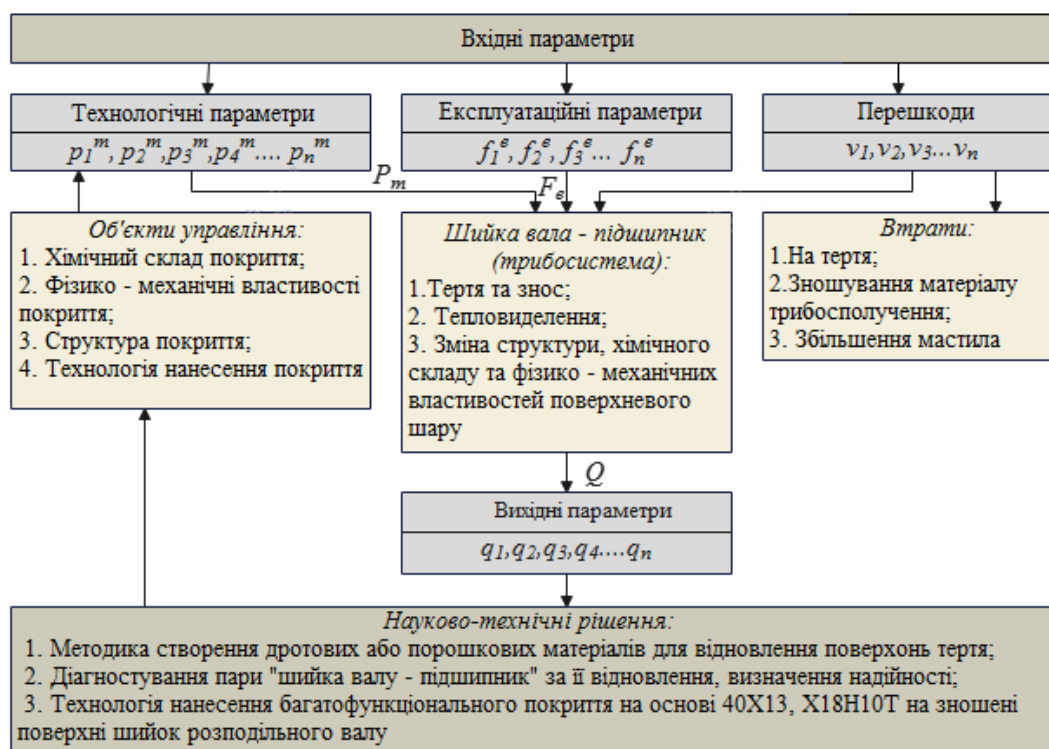


Рис. 1 – Блок-схема системи «технологія відновлення – розподільний вал – експлуатація»

Під час роботи розподільного валу на нього впливають сили інерції обертових мас та сили інерції мас, які здійснюють зворотно-поступальний рух. У сукупності ці фактори спричиняють знакозмінні крутні та згинальні моменти, а також викликають крутильні та поздовжні коливання, що при резонансі створюють додаткові напруження. Оскільки дії зазначених сил і моментів є змінними як за величиною, так і за напрямком, при розрахунку необхідно враховувати найбільш несприятливі умови експлуатації валів [9].

У процесі експлуатації шийки валу змащуються під тиском мастилом, яке подається через канали блоку-картера та внутрішню порожнину валу. Вони функціонують у парі з підшипниками ковзання, перебуваючи в умовах гідроабразивного зносу. Під час роботи на шийки валів впливають циклічні навантаження, що прискорюють їх зношування і в окремих випадках можуть спричинити вигин валу. При постійних зовнішніх умовах тертя та характеру контактування структурні фактори та фізико-механічні властивості поверхневого шару відіграють вирішальну роль у підвищенні зносостійкості.

Отже, найбільш перспективними об'єктами управління для забезпечення заданої довговічності шийок розподільного валу є хімічний склад і структура зносостійкого матеріалу, які, в свою чергу, багато в чому визначають фізико-механічні властивості покриття, а також параметри режиму формування.

Лабораторні випробування матеріалів на тертя та знос не забезпечують впливу всіх експлуатаційних факторів на пару тертя, не кажучи про перешкоди, які оказують не останній вплив на достовірність результатів випробувань. Стендові випробування забезпечують вплив експлуатаційних факторів, але не має можливості відтворити вплив перешкод. Тільки підконтрольні експлуатаційні випробування розподільних валів на судах, безпосередньо на двигуні, забезпечують можливість отримання достовірної інформації про всі вихідні параметри.

Деякі параметри, що визначаються під час випробувань, наприклад, знос, сила або момент тертя, не вимагають обговорення, чого не можна сказати про температуру. Температура – один із суттєвих параметрів, що характеризують трибологічні процеси, вона є однією з причин втрат при терті N , а також перешкод V .

Температура відіграє значну роль у зносі шийок розподільних валів судових дизелів. Високі температури можуть призвести до теплового розширення матеріалів, що збільшує зазор між шийками і підшипниками, знижує здатність мастила, що змащує, і, як наслідок, прискорює знос. Перепади температур у різних частинах двигуна, особливо в районі шийок розподільного валу, можуть створювати теплові напружки, які також сприяють зношуванню [10].

Підвищення довговічності розподільних валів з використанням технологічних методів нанесення зносостійких покриттів на робочі поверхні шийок

розподільчих валів можна розбити на три взаємопов'язані етапи (рис. 2):

- проектування технологічного процесу та відновлення деталі;
- експлуатацію відновлених плунжерних пар та оцінку їх надійності;
- удосконалення технології та організації технологічного процесу за результатами підконтрольної експлуатації відновлених деталей з метою підвищення довговічності.

Для ефективного управління процесом формування технологічних та експлуатаційних властивостей розподільних валів розроблена методика проектування уніфікованих технологічних процесів відновлення та зміцнення нанесенням багатофункціональних покриттів, що враховує всі етапи досліджень, рішення технологічних та оптимізаційних завдань.

При розробці технологічного процесу відновлення розподільного вала захисними покриттями необхідно враховувати і прогнозувати рівень допустимих напружень, який визначається значеннями величин адгезії покриття і когезійної взаємодії в системі «відновлювана поверхня – покриття». Будь-які напруження,

які спричиняють деформацію всього виробу або окремих його частин, впливають на адгезійні та когезійні властивості покриття й зрештою визначають його функціональність.

На експлуатаційні властивості шийок розподільних валів впливають як фізико-механічні властивості матеріалу поверхневого шару (твердість, ступінь зміцнення, залишкові напружки, межі міцності та витривалості тощо), так і геометричні показники поверхні (розмірна точність, відхилення форми, тощо) [11].

Довговічність деталі, відновленої нанесенням зміцнюючого покриття, залежатиме від структурного стану і параметрів (технологічний процес) та умов роботи (експлуатаційних факторів) розподільного вала, а також від характеру та ступеня впливу технології нанесення покриття на деталь в цілому.

Прийняття правильного рішення щодо вибору технологічного процесу з урахуванням структурних та енергетичних параметрів розподільного вала в процесі експлуатації дозволить забезпечити потрібний ресурс при мінімальних матеріальних затратах на її відновлення.

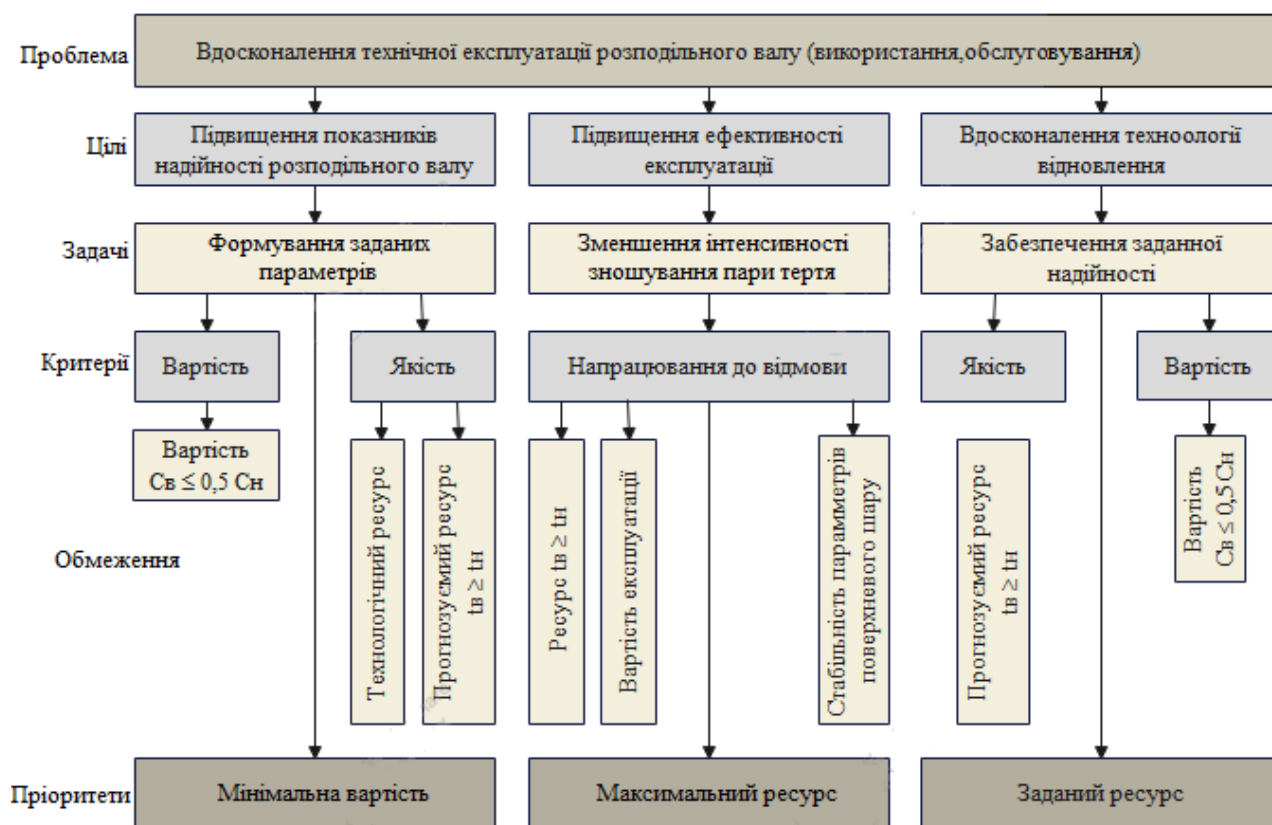


Рис. 2 – Структура цілей та завдань при розробці технологічного процесу відновлення розподільних валів: S_v – вартість відновленої деталі; S_n – вартість нової деталі; t_v – ресурс відновленої деталі; t_n – ресурс нової деталі

Для ефективного вирішення проблеми підвищення надійності та продовження терміну служби розподільних валів встановлено системну взаємодію факторів, які впливають на технологічний процес їх відновлення та зміцнення шляхом нанесення багатофункціональних покриттів (рис. 3). Вибір або розробка параметрів, які визначають стан процесу та впливають на його ефективність та якість (критеріальні параметри) при проектуванні технологічного процесу, забезпечить потрібну довговічність шийок розподільних валів. Виходячи з цього, можна сказати, що в основі факторів впливу на прийняття технологічного рішення лежать якісні та кількісні характеристики деталі та технологічного процесу відновлення та технологічні можливості ремонтного виробництва. Вибір номінальних значень критеріальних параметрів технологічного процесу здійснюється на підставі домінуючого виду зношування та заданого ресурсу (блоки 2.1, 3.1).

Аналіз і структуризацію об'єкта дослідження слід проводити з метою визначення критеріїв оптимізації (розглянуті в блоках 2.2 і 2.8), формування переліку незалежних змінних (факторів), а також встановлення складу контрольованих, некерованих і керованих

змінних. У цьому процесі визначаються рівні варіювання та фіксації для некерованих параметрів. Оптимізація методики відновлення і зміцнення шляхом нанесення багатофункціональних покриттів здійснюється на основі результатів експериментального дослідження системи «відновлювана поверхня – покриття». Основою для цього є вибраний критерій оптимізації, який спрямований на досягнення мінімального або максимального значення залежно від поставленої мети.

Після вибору оптимальних параметрів процесу напилення визначають спосіб механічної обробки шийок розподільного валу для отримання необхідного зазору. Специфіка будови та фазовий склад захисних шарів зумовлюють необхідність застосування особливих підходів до їх механічної обробки. Ці підходи відрізняються від тих, що використовуються для обробки деталей, виготовлених з однорідних металів. Розуміння характеристик покриттів дає можливість оптимізувати процес їх механічної обробки, мінімізуючи витрати. Для обробки покриттів можна використовувати широкий спектр методів, включаючи свердління, точіння, фрезерування та шліфування.

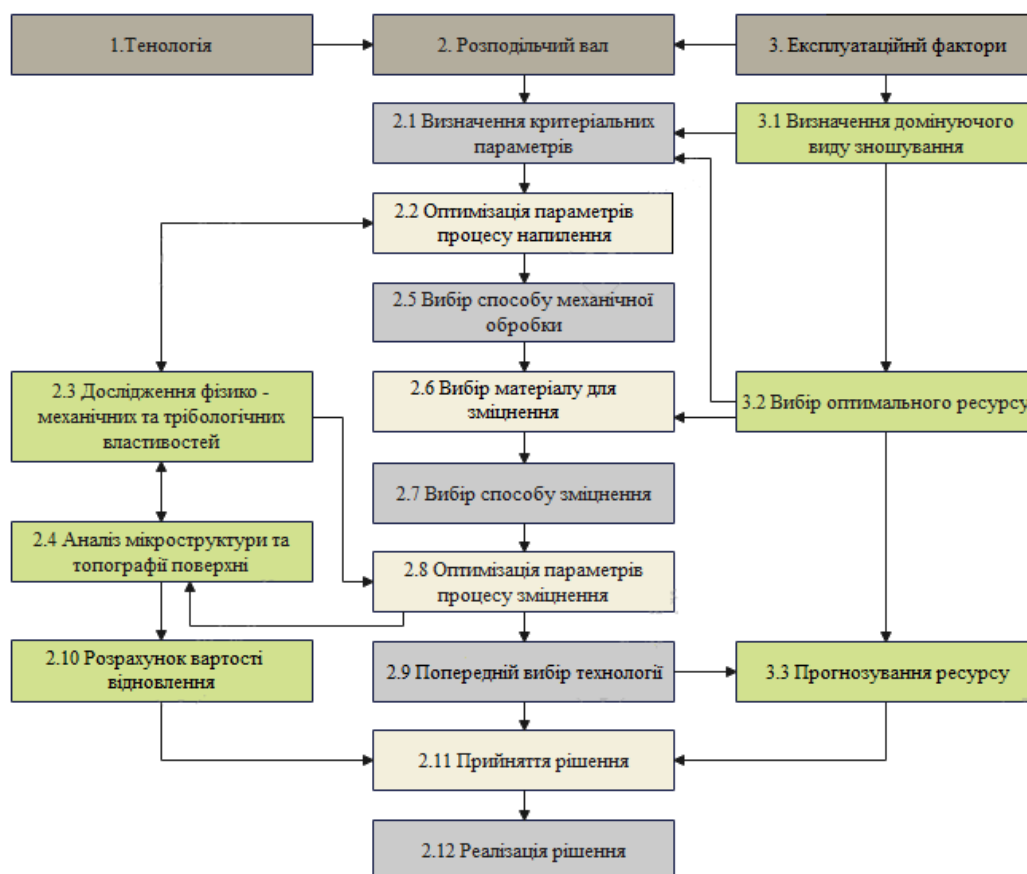


Рис. 3 – Блок-схема проектування технології відновлення та зміцнення шийок розподільного валу суднового двигуна нанесенням багатофункціональних покриттів

Важливим фактором для ефективної механічної обробки нанесених шарів є те, що сили, які з'являються під час різання, мають бути направлені не на відділення покриття від оброблюваної деталі, а на забезпечення притискання шару напиленого матеріалу до поверхні основи (блок 2.5).

Вибір матеріалу для покриття має суттєве значення під час розробки методики зміцнення й відновлення. Головне завдання такого матеріалу – поліпшення фізико-механічних показників відновлених поверхонь шийок розподільних валів, адже саме вони впливають на їхні ресурсні показники [12]. Характеристики обраного матеріалу для покриття залежать від умов, в яких працюють деталі, та їхньої конструкції. Оскільки знос розподільних валів є найчастішою причиною їхньої несправності (близько 80%), вимоги до зносостійких покриттів мають враховувати тип зносу, а їхній вибір має базуватися на результатах тривалих випробувань деталей на зносостійкість [13]. Умови зовнішнього середовища і руйнування робочої поверхні деталі визначають необхідний склад, структуру, фазовий стан і властивості матеріалу покриття. Властивості матеріалу впливають на зносостійкість і стійкість до корозії в конкретних умовах експлуатації і можуть змінити підхід до вибору матеріалів для цих умов експлуатації (блок 2.6). Найбільш перспективними матеріалами для зміцнення поверхонь тертя розподільних валів є дрти зі сталі 40X13, X18H10T аустенітного та мартенситного класу.

Як ефективний метод підвищення зносостійкості відновлених поверхонь, запропоновано азотування в імпульсному режимі, що одночасно формує високоміцні поверхневі шари і підвищує експлуатаційні характеристики (блок 2.7) [14].

Вибір оптимального ресурсу відновлюваної деталі (блок 3.2) полягає у визначенні оптимального ресурсу, який, як правило, дорівнює половині ресурсу двигуна. У разі неможливості технологічного забезпечення ресурсу відновленої деталі, на рівні ресурсу дизеля, він повинен бути не меншим за ресурс нової деталі.

Заключним етапом аналізу розробленого варіанта технологічного процесу відновлення є прогнозування ресурсу відновленої деталі [15], а також розрахунок вартості, визначення економічної ефективності та доцільності відновлення деталі (блоки 3.2, 2.11).

Ключовим фактором економічної вигоди від ремонту є відновлення деталей, що сприяє значній економії сировини, енергоресурсів та трудових витрат. Процес відновлення зношених елементів передбачає застосування технологій, спрямованих на повернення їхньої працездатності та продовження терміну служби. Це досягається шляхом відновлення втраченого матеріалу внаслідок зносу та/або корегування їхніх властивостей, які змінилися в процесі використання, до відповідних нормативних показників [16]. Приведення до відповідності стандартам стосується таких параметрів: стійкість до зношування, міцність, габарити та рівень

шорсткості робочих поверхонь; показники маси деталі та її розподіл відносно осей обертання та інерції; опірність корозії; витривалість до циклічних навантажень. Кожна з цих характеристик визначає якість відновленої деталі (блок 2.11).

Після проектування технології відновлення на підставі економічного аналізу та розрахунку довговічності деталі приймається остаточне вирішення питання: чи забезпечує технологічний процес усі технічні вимоги до деталі з урахуванням досвіду попередньої експлуатації та заданий ресурс? [17] (блок. 2.11) Крім того, вартість відновленої деталі повинна бути, як правило, не більше, ніж 50% від вартості нової. Після ухвалення рішення про доцільність впровадження розробленого технологічного процесу виготовляється дослідна партія деталей, їхня підконтрольна експлуатація проводиться для оцінки ресурсу відновлених розподільних валів [17] (блок 2.12).

Висновки

В статті представлена методика проектування технологічного процесу відновлення зношених поверхонь розподільного валу. Може використовуватися як типова для складових технологічного процесу формування зносостійких покриттів, що забезпечує взаємодію між факторами, які характеризують технологічний процес, а також для виявлення керованих факторів.

Для ефективного управління процесом формування технологічних та експлуатаційних властивостей розподільних валів розроблена методика проектування уніфікованих технологічних процесів відновлення та зміцнення нанесенням багатофункціональних покриттів, що враховує всі етапи досліджень, рішення технологічних та оптимізаційних завдань.

Запропонована методологічна схема відновлення розподільних валів судових двигунів зносостійкими покриттями дозволяє проводити оптимізацію технологічних схем отримання покриттів за критеріями їх експлуатаційної міцності, довговічності, цілісності структури, суцільності матеріалу і втомної міцності.

Перелік використаних джерел

- [1] Агєєв М. С., Шпак Л. М., Кавун В. І. Using combined technology of coating deposition for renovation of ship diesel generator shafts. *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції присвяченої пам'яті професорів Фомина Ю.Я. і Семенова В.С.*, Одеса (Україна) – Стамбул (Туреччина) – Одеса (Україна), 18-22 квітня 2019 р. С. 126-129.
- [2] Systematic approach to the study of working surfaces wear of automotive and tractor equipment parts / M. I. Chernovol et al. *Problems of Tribology*. 2024. Vol. 29, no. 1/111-2024, Pp. 53-60. DOI: <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2024-111-1-53-60>.
- [3] Агєєв М. С., Манжелей В. С., Дзигар А. К. Нанесення захисних покриттів для підвищення

- зносостійкості та ресурсу при ремонті валів суднових СДВЗ. *Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування* : матеріали 11-ої Міжнародної науково-практичної конференції, м. Херсон, 08-10 вересня 2020 р. Херсон: Херсонська державна морська академія, 2020. С. 236-239.
- [4] Агеєв М. С., Черненко В. В. Розробка та реалізація концепції забезпечення надійності відновлюваних деталей засобів транспорту в процесі ремонту на базі системного аналізу. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2022. Вип. 44. С. 62-72. DOI: <https://doi.org/10.32782/2225-6733.44.2022.8>.
- [5] Пацера С. Т., Проців В. В. Системно-структурна оптимізація процесів обробки на верстатах з ЧПК: конспект лекцій. Д. : НТУ «Дніпровська політехніка», 2020. 91 с.
- [6] Saunders S. R. J., Nicholls J. R. Coatings and surface treatments of high temperature oxidation resistance. *Materials Science and Technology*. 1989. Vol. 5. Pp. 780-788. DOI: <https://doi.org/10.1179/mst.1989.5.8.780>.
- [7] Агеєв М. С., Устінцев С. М. Управління технологією відновлення поверхонь деталей транспортних засобів у процесі ремонту. *Сучасні енергетичні установки на транспорті та технології й обладнання для їх обслуговування* : матеріали 13-ї Міжн. наук.-практ. конф., м. Херсон, 7-9 вересня 2022 р. Херсон: Херсонська державна морська академія, 2022. С. 169-173.
- [8] The methodologies and strategies for the development of novel material systems and coatings for applications in extreme environments - a critical review / M. Urbina et al. *Manufacturing review*. 2018. Vol. 5. Article 9. DOI: <https://doi.org/10.1051/mfreview/2018006>.
- [9] Стецько А. Є. Технологічне забезпечення ресурсу роботи виготовлених і відновлених деталей: монографія. Львів: Видавнича компанія «АРС», 2013. 240 с.
- [10] Testing scuffing resistance of materials for marine 2-stroke engines – Difficulties with lab scale testing of a complex phenomenon / P. Olander et al. *Wear*. 2015. Vol. 340-341. Pp. 9-18. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.06.015>.
- [11] Большаков В. І., Глушкова Д. Б., Костіна Л. Л. Вибір оптимальних режимів відновлення підшипників. *Металургія та термічна обробка металів*. 2015. № 4. С. 43-48.
- [12] Нанесення покриттів: підручник / Корж В. М., Кузнецов В. Д., Борисов Ю. С., Ющенко К. А.; за редакцією К. А. Ющенко. К. : Арістей, 2005. 204 с.
- [13] Crawmer D. E. Coating structures, properties, and materials. *Handbook of thermal spray technology*. 2013. Pp. 60-64. DOI: <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v05a.a0005755>.
- [14] Ahieiev M., Gritsuk I., Litikova A. Application of combined electric arc coatings for parts and units of vehicles recovery in Repair Technologies. *SAE Technical Paper Series*. 2021. DOI: <https://doi.org/10.4271/2021-01-5100>.
- [15] Milewsski W., Sartowski M. Some properties of coatings ARC-spread in nitrogen or argon atmosphere. *Advances in Thermal Spraying* : Proceedings of the ITSC 86, Montreal, Canada, 8-12 September 1986. New York: Pergamon Press, 1986. Pp. 467-475.
- [16] Черновол М. І., Шепеленко І. В. Системний підхід до формування показників якості відновлених деталей. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2023. Вип. 7 (38), ч. 1. С. 30-36. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).1.30-36](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).1.30-36).
- [17] Криськов О. Д. Економічна оцінка технологічного рішення в момент його прийняття. *Машиностроение и техносфера XXI века* : сборник трудов XV Международной научно-технической конференции, г. Севастополь, 15 - 20 сентября 2008 г. Донецк, 2008. Т. 2. С.161-165.

METHODOLOGY FOR DEVELOPING A TECHNOLOGICAL PROCESS FOR RESTORATION OF CAMSHAFT OF MARINE ENGINES WITH WEAR-RESISTANT COATINGS

Ahieiev M.S.	D.Sc. (Engineering), professor, Kherson State Maritime Academy, Kherson, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5691-8986 , e-mail: maxageev73-73@ukr.net ;
Dzygar A.K.	senior lecturer, Kherson State Maritime Academy, Kherson, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5947-6263 , e-mail: anatoliidzygar@gmail.com ;
Ustintsev S.N.	postgraduate student, Kherson State Maritime Academy, Kherson, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4352-9479 , e-mail: sustincev@gmail.com

One of the tasks of forming multifunctional coatings to ensure a given friction nodes resource can be considered to be taking into account the behavior of interdependent parameters of the system «repair technology - part – operation». Random changes in technological and operational factors complicate the assessment of material parameters in the process of forming a wear-resistant coating and its selection and do not provide the opportunity to make adjustments, as well

as to take into account structural changes in the surface layer of the material during technical operation. In recent years, the solution to the problem of increasing the operational properties of friction nodes has been increasingly linked to the development of methods for applying wear-resistant coatings in the process of restoration repair. The selection of wear-resistant coatings is carried out according to such a basic indicator as the magnitude of wear [1]. However, this aspect alone is not enough to optimally determine the material and method for creating a protective coating for parts subject to friction. It is important to consider the structural and technological needs that arise during the use process as a whole [2]. The article presents a methodology for designing a technological process for restoring worn surfaces of friction nodes. It can be used as a typical one for components of the technological process for forming wear-resistant coatings, which ensures interaction between factors that characterize the technological process, as well as for identifying controllable factors. The object of design is the technological process of restoring the camshaft of a ship's engine by applying multifunctional coatings during the repair process, which ensures a given service life.

Keywords: technological process, design, camshaft, technological parameters, operational parameters, wear-resistant coatings, repair, resource.

References

- [1] M.S. Ahieiev, L.M. Shpak, and V.I. Kavun, "Using combined technology of coating deposition for renovation of ship diesel generator shafts," in *Proc. of the Int. Sci. and Pract. Conf. dedicated to the memory of professors Fomin Yu.Ya. and Semenov V.S.*, Odessa (Ukraine) – Istanbul (Turkey) – Odessa (Ukraine), Apr. 18-22, 2019, pp. 126-129.
- [2] M.I. Chernovol, V.M. Kropivnyi, Y.V. Kuleshkov, I.V. Shepelenko, and V.I. Gutsul, "Systematic approach to the study of working surfaces wear of automotive and tractor equipment parts," *Problems of Tribology*, vol. 29, no. 1/111-2024, pp. 53-60, 2024. doi: [10.31891/2079-1372-2024-111-1-53-60](#).
- [3] M.S. Ahieiev, V.S. Manzhelei, and A.K. Dzygar, "Nanesennia zakhysnykh pokryttiv dlia pidvyshchennia znosostiikosti ta resursu pry remonti valiv sudnovykh SDVZ" ["Application of protective coatings to increase wear resistance and service life when repairing ship propeller shafts"], in *Proc. of the 11-th Int. Sci.-Pract. Conf. «Modern energy installations in transport and technologies and equipment for their maintenance»*, Kherson, Ukraine, Sept. 08-10, 2020, pp. 236-239. (Ukr.)
- [4] M.S. Ahieiev, and V.V. Chernenko, "Rozrobka ta realizatsiia kontseptsii zabezpechennia nadiinosti vidnovliuvanykh detalei zasobiv transportu v protsesi remontu na bazi systemnoho analizu" ["Development and implementation of the concept of ensuring the reliability of recoverable parts of means of transport during the repair process based on a system analysis"], *Visnyk Pryazovskoho Derzhavnoho Tekhnichnoho Universytetu. Seriia: Tekhnichni Nauky – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, vol. 44, pp. 62-72, 2022. doi: [10.32782/2225-6733.44.2022.8](#).
- [5] S.T. Patsera, and V.V. Protsiv, *Systemno-strukturna optymizatsiia protsesiv obrobky na verstatakh z ChPK: konspekt lektsii* [System-structural optimization of machining processes on CNC machines: lecture notes]. Dnipro, Ukraine: NTU «Dnipro Polytechnic» Publ., 2020. (Ukr.)
- [6] S.R.J. Saunders, and J.R. Nicholls, "Coatings and surface treatments of high temperature oxidation resistance," *Materials Science and Technology*, vol. 5, pp. 780-788, 1989. doi: [10.1179/mst.1989.5.8.780](#).
- [7] M.S. Ahieiev, and S.M. Ustintsev, "Upravlinnia tekhnolohiieiu vidnovlennia poverkhon detalei transportnykh zasobiv u protsesi remontu" ["Management of technology for restoring vehicle parts surfaces during repair"], in *Proc. of the 13-th Int. Sci.-Pract. Conf. «Modern energy installations in transport and technologies and equipment for their maintenance»*, Kherson, Ukraine, Sept. 07-09, 2022, pp. 169-173. (Ukr.)
- [8] M. Urbina et al., "The methodologies and strategies for the development of novel material systems and coatings for applications in extreme environments - a critical review," *Manufacturing review*, vol. 5, article 9, 2018. doi: [10.1051/mfreview/2018006](#).
- [9] A.Ie. Stetsko, *Tekhnolohichne zabezpechennia resursu roboty vyhotovlenykh i vidnovlenykh detalei: monohrafiia* [Technological support of the service life of manufactured and restored parts: monograph]. Lviv, Ukraine: Publishing company «ARS», 2013. (Ukr.)
- [10] P. Olander, S.S. Eskildsen, J.W. Fogh, P. Hollman, and S. Jacobson, "Testing scuffing resistance of materials for marine 2-stroke engines - Difficulties with lab scale testing of a complex phenomenon," *Wear*, vol. 340-341, pp. 9-18, 2015. doi: [10.1016/j.wear.2015.06.015](#).
- [11] V.I. Bolshakov, D.B. Hlushkova, and L.L. Kostina, "Vybir optymalnykh rezhymiv vidnovlennia pidshypnykiv" ["Selection of optimal bearing restoration modes"], *Metalurhiia ta termichna obrobka metaliv – Metallurgy and heat treatment of metals*, № 4, pp. 43-48, 2015.
- [12] V.M. Korzh, V.D. Kuznietsov, Yu.S. Borysov, K.A. Yushchenko, *Nanesennia pokryttiv: pidruchnyk* [Coating Application: Textbook], K.A. Yushchenko, Ed. Kyiv, Ukraine: Aristei Publ., 2005. (Ukr.)
- [13] D.E. Crawmer, "Coating structures, properties, and materials," in *Handbook of thermal spray technology*, 2013, pp. 60-64. doi: [10.31399/asm.hb.v05a.a0005755](#).

- [14] M. Ahieiev, I. Gritsuk, and A. Litikova, "Application of combined electric arc coatings for parts and units of vehicles recovery in Repair Technologies," *SAE Technical Paper Series*, 2021. doi: 10.4271/2021-01-5100.
- [15] W. Milewski, and M. Sartowski, "Some properties of coatings ARC-spread in nitrogen of argon atmosphere," in *Proc. of the ITSC 86 «Advances in Thermal Spraying»*, Montreal, Canada, Sept. 08-12, 1986, pp. 467-475.
- [16] M. Chernovol, and I. Shepelenko, «Systemnyi pidkhid do formuvannya pokaznykiv yakosti vidnovlenykh detalei» [«A Systematic Approach to Forming Quality Indicators for Refurbished Parts»], *Tsentrlnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky – Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, vol. 7 (38), part 1, pp. 30-36, 2023. doi: 10.32515/2664-262X.2023.7(38).1.30-36.
- [17] O.D. Kryskov, "Ekonomichna otsinka tekhnolohichnoho rishennia v moment yoho pryiniattia" ["Economic evaluation of a technological solution at the time of its adoption"], in *Proc. of the XV Int. Sci.-Pract. Conf. «Mechanical engineering and technosphere of the 21st century»*, Sevastopol, Ukraine, Sept. 15-20, 2008, vol. 2, pp. 161-165.
- Стаття надійшла 21.05.2025
Стаття прийнята 28.06.2025
Стаття опублікована 30.10.2025

Цитуйте цю статтю як: Агєєв М. С., Дзигар А. К. Методика проектування технологічного процесу відновлення розподільних валів суднових двигунів зносостійкими покриттями. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 51. С. 231-239. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344957>.