МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

Барановський Денис Миколайович

УДК 629.424

РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ДИЗЕЛІВ СПЕЦІАЛЬНОГО САМОХІДНОГО РУХОМОГО СКЛАДУ ЗАЛІЗНИЦЬ

Спеціальність 05.22.20 – Експлуатація та ремонт засобів транспорту

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Дніпропетровськ – 2012

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна (ДІІТ) Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Мямлін Сергій Віталійович,
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, проректор з наукової роботи.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Босов Аркадій Аркадійович,
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, професор кафедри «Прикладна математика».

доктор технічних наук, професор
Пильов Володимир Олександрович,
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
в.о. завідувача кафедри «Двигуни внутрішнього згоряння».

доктор технічних наук, професор
Тартаковський Едуард Давидович,
Українська державна академія залізничного транспорту, завідувач кафедри «Експлуатація та ремонт рухомого складу».

Захист відбудеться "6" червня 2012 р. об 11^{00} годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д08.820.02 при Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна за адресою: 49010, м. Дніпропетровськ, вул. Лазаряна, 2, ауд. 314.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна за адресою: 49010, м. Дніпропетровськ, вул. Лазаряна, 2.

Автореферат розісланий "____" ________ 2012 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
доктор технічних наук, професор _________ І.В. Жуковицький

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. На сучасному етапі розвитку залізничного транспорту України та збільшенні обсягів ремонтних робіт, що пов'язані із підвищенням швидкостей руху рухомого складу та пропускною здатністю залізниць, спеціальний самохідний рухомий склад (ССРС) залізниць повинен бути у постійній готовності для виконання невідкладних робіт колійного господарства та господарств енергопостачання. Тому постає проблема забезпечення високого рівня надійності та довговічності ССРС залізниць для підтримки їх працездатності та ефективності експлуатації.

Дизелі мають особливе місце в сукупності відмов ССРС залізниць. Дослідження надійності та довговічності агрегатів сучасного ССРС показує, що в середньому 34…47% відмов приходиться на дизель, 7…19% – на трансмісію, 6…19% – на ходову частину, 5…18% – на електрообладнання, 8…19% – на гідрообладнання, 5…15% – на пневмосистеми, 7…24% – робоче (навісне) обладнання. Значний діапазон даних по відмовам пояснюється різним призначенням та областю використання ССРС залізниць.

Термін служби ССРС, згідно паспортних даних, становить 25 років, а експлуатацію дизелів припиняють за 30…40 % раніше від встановленого терміну служби з наступною заміною старого силового агрегату на новий. Тому, наряду з цим, постає проблема у підвищенні довговічності дизелів та забезпеченні їх працездатності та ефективності експлуатації.

Визначення довговічності, ресурсу та залишкового ресурсу дизелів є складним процесом, оскільки врахування багатьох експлуатаційних та технологічних факторів практично неможливе, особливо в умовах експлуатації залізниць.

У міру зростання напрацювання деталей дизелів ССРС залізниць, безперервно відбуваються зміни їх технічного стану, які пов'язані із процесами зношування, корозії, накопичення втоми, деформацій, забруднення та ін. Ці процеси мають необоротний характер: знижується або втрачається працездатність ССРС у результаті зносу деталей дизелів.

Поточні та ресурсні відмови дизелів ССРС залізниць приводять до нездатності виконувати їм задані функції, з наступною зупинкою ССРС для ремонту і регулювання, що в умовах експлуатації залізниць є неприпустимим. Дослідження поточних та ресурсних відмов дизелів дозволять обґрунтувати та розробити ефективні заходи та засоби, які будуть сприяти підвищенню рівня довговічності та забезпеченню працездатності дизелів ССРС залізниць.

Для всіх періодів роботи дизелів, їх надійність та довговічність суттєво залежить від технічних характеристик та кількості відмов циліндро-поршневої групи (ЦПГ) та кривошипно-шатунного механізму (КШМ), оскільки більше 85% ресурсних відмов припадає саме на ці системи.

Ресурсні відмови дизеля відбуваються через знос його трибосистем (ТС), особливістю яких при експлуатації є одночасна дія різних видів зносу, співвідношення яких залежать від конструкції дизеля, технології виготовлення його деталей, якості вживаних експлуатаційних матеріалів, зовнішніх умов тощо.

У сучасному машинобудуванні застосовується значна кількість методів підвищення зносостійкості поверхонь тертя для забезпечення високого рівня довговічності. До них можна віднести конструкторські, технологічні і систему технічного обслуговування під час експлуатації.

Серед відомих і ефективних способів підвищення зносостійкості поверхонь тертя багато з них не застосовуються для зміцнення сполучень ТС ЦПГ і КШМ з причини високої вартості та масштабного фактора. При виборі методу зміцнення робочих поверхонь деталей дизелів потрібно виходити з виробничого масштабу та враховувати техніко-економічну доцільність зміцнення чи модифікування. Тому, існуючі методи підвищення зносостійкості поверхонь тертя не можуть бути застосовані до дизелів у повному обсязі. Виникає необхідність розробки нових ефективних технологічних методів забезпечення належної зносостійкості ТС.

При введенні в експлуатацію залізниць нового ССРС, у ТС дизелів відбуваються процеси припрацювання, які здійснюють значний вплив на довговічність у цілому. Це питання теж потребує досліджень, розробок та заходів для забезпечення високої ефективності роботи дизелів ССРС у процесі експлуатації. А від тривалості припрацювання відповідальних ТС дизелів суттєво залежить період його нормальної роботи та настання моменту граничного зносу, що дає підстави для розробок технологій прискорення процесів припрацювання відповідальних ТС дизелів.

Закономірності зміни технічного стану дизелів ССРС залізниць, узагальнення методів їх діагностування і прогнозування ресурсу, які враховували б індивідуальні особливості й умови експлуатації у системі технічного обслуговування та ремонту (ТОР) є також актуальним напрямком досліджень, які дозволять забезпечити високий рівень працездатності та довговічності. Впровадження моніторингу технічного стану дизелів ССРС у процес експлуатації дозволить скоротити затрати, пов’язані з передчасним ремонтом, а раціональне використання їх ресурсу приведе до значної економії матеріалів, зменшення енергетичних і трудових витрат.

Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана відповідно до головних напрямків розвитку науки і техніки, Закону України про наукову і науково-технічну діяльність, відповідно до щорічних координаційних планів НДДКР «Укрзалізниці», концепції і Програми реструктуризації на залізничному транспорті України, затвердженої рішенням Колегії Міністерства транспорту України (протокол №30 від 18.08.1998 р.); Концепції реформування транспортного сектора України; галузевої Програми підвищення безпеки руху на залізницях України, затвердженої наказом Укрзалізниці №547-ц від 15.10.2001 р.; проекту Державної програми розвитку рейкового рухомого складу залізниць України в 2002-2010 р., а також затвердженої програми наукової діяльності Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського в рамках тем: «Розробка системи технічного обслуговування та ремонту дизелів» (тема 200/10, номер держреєстрації 0110U006894, 2010 р.), «Використання ефектів струминно-проминевого впливу для прецизійного формоутворення виробів із композитів з трансформацією властивостей поверхневих шарів» (держбюджетна тема № держреєстрації 0109U003098, 2009-2011 рр. відповідно до плану НДР Міністерства освіти і науки України).

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є розвиток наукових основ підвищення довговічності дизелів ССРС залізниць.

Для реалізації поставленої мети необхідне розв’язання наступних задач:

1. Провести аналізи роботи дизелів ССРС залізниць, методів підвищення та підходів до визначення їх довговічності.
2. Здійснити теоретичну оцінку довговічності дизелів ССРС залізниць.
3. Отримати вираз для знаходження інтенсивності зносу ТС дизелів з урахуванням експлуатаційних факторів при використанні різних методів підвищення їх довговічності.
4. Розробити модель для прогнозування довговічності дизелів на основі синергетичного підходу та кінетичної концепції руйнування матеріалів ТС.
5. Теоретично обґрунтувати та експериментально підтвердити застосування лазерного модифікування ТС дизелів з введенням природного графіту та вуглекислого газу у зону опромінення для підвищення їх довговічності.
6. Підтвердити вплив прискорення процесу припрацювання з додаванням природного графіту до моторного масла та при експлуатаційній модифікації ТС ЦПГ на підвищення довговічності дизелів ССРС залізниць.
7. Запропонувати математичну модель для описання оптимальних термінів проведення ТОР дизелів ССРС залізниць у залежності від експлуатаційних параметрів з наступним визначенням їх довговічності.

Об’єкт дослідження – процеси експлуатації дизелів ССРС залізниць.

Предмет дослідження – методи підвищення довговічності дизелів ССРС залізниць.

Методи дослідження. Під час проведення теоретичних досліджень були використанні основні положення теорій термодинаміки, неврівноваженої термодинаміки, фізики твердого тіла, синергетики, теорії взаємодії лазерного випромінювання з речовиною, теорії тертя та зношування, теорії надійності технічних систем. Також, методи дослідження передбачали застосування сучасних експериментальних приладів і засобів, різноманітних існуючих і вперше розроблених спеціальних методик, використання ЕОМ, даних математичної обробки статистичного матеріалу за наслідками досліджень, великого об’єму стендових і експлуатаційних випробувань дизелів ССРС залізниць.

Обґрунтованість та достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій, які захищаються. Достовірність та обґрунтованість приведених в дисертаційній роботі математичних моделей, підходів, наукових положень та отриманих результатів обумовлені коректними математичними постановками задач, використанням сучасного математичного апарата для їх вирішення. Результати теоретичних досліджень збігаються з експериментальними дослідженнями, дані яких отримані на діючому ССРС залізниць упродовж 5 років експлуатації в межах 5% похибки.

Положення та висновки, наведені в дисертації, в достатній мірі науково обґрунтовані. Основні припущення та спрощення, прийняті в роботі є коректними для вирішення задач, які розглядаються в роботі.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному.

Вперше одержано:

- модель для прогнозування довговічності дизелів на основі синергетичного підходу та кінетичної концепції руйнування матеріалів трибосистем, яка враховує показники безвідмовності, систему технічного обслуговування та ремонту і умови роботи спеціального самохідного рухомого складу залізниць, застосування різних технологічних методів підвищення довговічності та процеси припрацювання в трибосистемах. Модель включає вираз для прогнозування залишкового ресурсу дизелів при наявності даних про їх технічний стан, проходження процесів самоорганізації в трибосистемах у залежності від розподілення часу їх роботи;

- математичні моделі термінів проведення технічного обслуговування та ремонту, міжремонтного ресурсу та довговічності дизелів спеціального самохідного рухомого складу залізниць у залежності від експлуатаційних параметрів: годинної та питомої витрат палива з урахуванням ймовірності безвідмовної роботи, фіксуючи які в процесі експлуатації та порівнюючи із значенням їх граничної величини можна визначити терміни проведення технічного обслуговування, а знаючи кількість номерних ТО та КР – надати оцінку міжремонтному ресурсу та довговічності дизелів;

- залежність інтенсивності зносу трибосистем дизелів з урахуванням експлуатаційних факторів при використанні різних методів підвищення їх довговічності, яка дозволяє обрати раціональний технологічний метод для відповідних умов експлуатації спеціального самохідного рухомого складу залізниць із забезпеченням найнижчого значення інтенсивності зносу трибосистем.

Одержали подальший розвиток:

- метод прогнозування залишкового ресурсу дизелів за діагностичними параметрами, який включає моніторинг їх технічного стану та дозволяє з високою ймовірністю визначати граничний, залишковий та використаний ресурс, найбільш обґрунтовано приймати конкретні технічні рішення щодо відновлення технічного стану дизелів спеціального самохідного рухомого складу залізниць у конкретні моменти експлуатації;

- математична модель для опису оптимальних термінів проведення технічного обслуговування та ремонту дизелів на основі регенеруючих, марківських та напівмарківських процесів, яка включає залежності ймовірності безвідмовної роботи, коефіцієнту готовності та ймовірності виконання задач від часової функції для наступного вибору стратегії технічного обслуговування та ремонту і вказує на необхідність врахування повноти інформації, що належить до категорії відмов відповідальних трибосистем.

Удосконалено:

- спосіб лазерного модифікування трибосистем, в якому запропоновано, обґрунтовано та доведено доцільність у якості модифікатору використовувати природний графіт з ніобієм або вуглекислий газ для підвищення довговічності дизелів;

- модель для визначення інтенсивності зносу трибосистем дизелів у процесі припрацювання, яку отримано на основі теорій тертя та зношування з використанням основних положень теорії дислокаційно-вакансійного механізму;

- спосіб прискорення процесу припрацювання трибосистем дизелів спеціального самохідного рухомого складу залізниць, в якому передбачено

додавання природного графіту з ніобієм до моторного масла та його введення у камеру згоряння у відповідний такт роботи циліндрів.

Практичне значення одержаних результатів полягає у наступному:

- на основі експлуатаційних випробувань дизелів на діючому ССРС залізниць у центрі механізації колійних робіт ст. Знам'янка та Знам'янській дистанції колії Одеської залізниці впроваджені результати досліджень модифікованих гільз циліндрів та колінчастих валів лазерним випромінюванням з подачею природного графіту з ніобієм та вуглекислим газом, експлуатаційної модифікації для прискорення процесу припрацювання відповідальних ТС з подачею природного графіту з ніобієм до камери згоряння та надані рекомендації щодо режимів технологічних процесів;
- на підставі отриманих наукових результатів, які складають єдиний комплекс досліджень, запропонована система методичних положень застосування розроблених моделей та методів прогнозування залишкового ресурсу дизелів ССРС залізниць за діагностичними детермінованими та випадковими параметрами, а також з урахуванням експлуатаційних факторів при наявності даних про їх технічний стан та проходження процесів самоорганізації в ТС;
- для вибору раціональної системи експлуатації дизелів ССРС залізниць у заданих умовах роботи впроваджено проведення ТОР у залежності від експлуатаційних параметрів та від їх технічного стану (під час моніторингу);
- вибір технологічного методу підвищення довговічності ТС дизелів пропонується здійснювати за показником інтенсивності їх зносу.

Особистий внесок здобувача. Основні положення й результати, наведені в роботі, отримані автором самостійно, які відображені в роботах [12-22, 25-28]:

- планування та безпосереднє проведення теоретичних та експериментальних досліджень, аналіз отриманих результатів, розробка наукових положень та висновків;
- розробка математичних моделей для визначення залишкового, міжремонтного ресурсів та довговічності дизелів ССРС залізниць на основі синергетичного підходу, позицій термодинаміки, кінетичної концепції руйнування матеріалів, теорії ймовірності;
- розробка наукових положень щодо підвищення довговічності дизелів ССРС залізниць, що являє собою комплексний підхід до вирішення цієї проблеми;
- удосконалення методу лазерного модифікування ТС дизелів з пропозицією використовувати природний графіт з ніобієм і вуглекислий газ при подачі їх під тиском у зону опромінення;
- удосконалення методу прискорення процесів припрацювання відповідальних ТС дизелів, що передбачає експлуатаційну модифікацію ТС ЦПГ та полягає у введенні природного графіту з ніобієм до камери згоряння під час такту впуску;
- розробка наукових положень щодо проведення ТОР дизелів ССРС залізниць при моніторингу експлуатаційних параметрів: годинної, питомої витрати палива, ефективної потужності з урахуванням ймовірності безвідмовної роботи.

У публікаціях, опублікованих у співавторстві, авторові роботи належить:

- розробка підходів до визначення технічного стану дизелів, проведення експериментальних досліджень [4-6, 16-18];

- дослідження техніко-експлуатаційних параметрів дизелів ССРС залізниць при використанні модифікованих трибосистем та їх вплив на довговічність [10, 13, 32];

- встановлення технічних характеристик дизелів ССРС залізниць при використанні модифікованих трибосистем [11, 12, 34];

- математико-статистична обробка даних та графічна інтерпретація довговічності дизелів ССРС залізниць [14, 38];

- розробка математичної моделі для описання залежності інтенсивності зносу трибосистем дизелів у процесі припрацювання [15, 35];

- встановлення зв’язку термінів проведення технічного обслуговування і технічного стану дизелів [26];

- розробка математичної моделі надійності дизелів у залежності від діагностичних параметрів [27];

- комп’ютерне моделювання напружено-деформованого та термонапруженого станів гільз циліндрів дизелів [33];

- встановлення енергоресурсних характеристик дизелів ССРС залізниць при застосуванні експлуатаційної модифікації трибосистем [36];

- розробка підходів для обґрунтування підвищення довговічності дизелів при протіканні процесів самоорганізації [37];

- розробка моделі для визначення інтенсивності зносу трибосистем дизелів при застосуванні лазерного модифікування [38];

- дослідження технічних характеристик дизелів ССРС залізниць при додаванні природного графіту з ніобієм до моторного масла [39];

- математико-статистична обробка даних для визначення основних показників надійності, порівняльна оцінка довговічності дизелів ССРС залізниць [40].

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати досліджень доповідалися на: міжнародній наук.-практ. конференції “Сучасні інформаційні технології в управлінні та професійній підготовці операторів складних систем”, (м. Кіровоград, 10 грудня 2008 р.), международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения профессора Д.Г. Вадивасова, (г. Саратов (Россия), 2-5 февраля 2009 г.), міжнародній наук.-практ. конференції “Проблеми транспорту” (м. Кременчук, 3-5 грудня 2009 р.), першій міжнародній словацько-українській конференції (м. Банська Бистрика (Словаччина), 14 квітня 2010 р.), 70-й міжнародній наук.-практ. конференції "Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту" (м. Дніпропетровськ, 15-16 квітня 2010 р.), всеукраїнській міжвузівській наук.-техн. конференції «Сучасні технології в промисловому виробництві» (м. Суми, 19-23 квітня 2010 р.), І міжнародній наук.-практ. конференції «Інноваційні технології на залізничному транспорті» (м. Красний Лиман, 4-6 травня 2010 р.), міжнародній наук.-техн. конференції «Науково-прикладні аспекти автомобільної галузі» (м. Луцьк, 17-18 травня 2010 р.), XI міжнародній наук.-техн. конференції присвяченої 100-річчю від дня народження ак. НАН України Г.С. Писаренка (м. Київ, 18-21 травня 2010 р.), XV международном конгрессе двигателестроителей (Харьков – Рыбачье, 14-19 сентября 2010 г.), міжнародній наук.-техн. конференції «Сучасні тенденції розвитку машинобудування та транспорту» присвяченої 50-річчю університету (м. Кременчук, 10-12 листопада

2010 р.), V міжнародній наук.-практ. конференції «Проблеми і перспективи розвитку транспортних систем: техніка, технологія, економіка і управління» (24-25 березня 2011 р.), 71-й міжнародній наук.-практ. конференції "Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту" (м. Дніпропетровськ, 9-10 квітня 2011 р.), 6th International Conference «Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems – ITELMS'2011» (Panevezys, Lithuania, 5-6 мая 2011 р), XII міжнародній наук.-техн. конференції «Прогресивна техніка та технологія – 2011» (м. Київ – м. Севастополь, 21-24 червня 2011 р.).

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 1 монографію, 39 статей, у тому числі, 39 статей у наукових фахових виданнях (з них 16 – без співавторів), 9 публікацій тез у матеріалах міжнародних наукових конференцій, одержано 6 патентів України.

Структура та обсяг роботи. Загальний обсяг роботи становить 353 сторінки. Основний матеріал дисертації складається зі вступу, п’яти розділів, загальних висновків, викладених на 264 сторінках машинописного тексту та містить 97 рисунків, 13 таблиць. Додатки викладені на 59 сторінках, а перелік використаних джерел становить 307 найменувань, розміщених на 30 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі розкрита сутність дисертаційної роботи і обґрунтована актуальність її теми, наведено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів.

У першому розділі проаналізовані стан проблеми та фактори, які впливають на довговічність дизелів, а також розглянуті методи підвищення довговічності дизелів.

Проведений аналіз роботи дизелів ССРС залізниць різних господарств показав значний вплив експлуатаційних факторів на їх ресурсні відмови та на довговічність у цілому. З’ясовано, що поточні та ресурсні відмови дизелів ССРС залізниць приводять до нездатності виконувати їм задані функції, з наступною зупинкою ССРС для ремонту і регулювання, що в умовах експлуатації залізниць є неприпустимим. При цьому, дослідження таких відмов дозволяють обґрунтувати та розробити ефективні заходи та засоби, які сприяють підвищенню рівня довговічності та забезпеченню працездатності дизелів ССРС залізниць.

Встановлено, що у міру зростання напрацювання деталей дизелів ССРС залізниць, безперервно відбуваються зміни їх технічного стану, які пов’язані із процесами зношування, корозії, накопичення втоми, деформацій, забруднення та ін. Ці процеси мають необоротний характер: знижується або втрачається працездатність ССРС у результаті зносу деталей дизелів. Ресурсні відмови дизеля відбуваються через знос його ТС, особливістю якого при експлуатації є одночасна дія різних видів зношування, співвідношення яких залежать від конструкції дизеля, технології виготовлення його деталей, якості вживаних експлуатаційних матеріалів, зовнішніх умов тощо.

Показано, що довговічність дизелів ССРС залізниць і необхідність їх ремонту можна визначати за величиною зносу їх основних ТС. Одними з відповідальних ТС дизелів є «гільза циліндрів – кільце» та «вкладиш – колінчастий вал». Якщо прийняти знос всіх сполучень дизеля за 1, то сумарний знос ЦПГ і КШМ становить

0,75...0,85, а на решту сполучень припадає 0,15...0,25. Тому, в процесі експлуатації дизелів, дуже важливо знати залишковий ресурс їх відповідальних ТС. Таким чином, прогнозування залишкового ресурсу дизеля зводиться до прогнозування ресурсу основних ТС, які можна розглядати як індикатори відмов. Застосування методів прогнозування в період експлуатації дизелів ССРС залізниць вирішує ряд важливих задач і дозволяє обґрунтувати терміни профілактичних робіт для попередження майбутньої відмови, оптимізувати програму пошуку несправностей у зв'язку з визначенням відповідальних ТС, в яких очікується відмова, обмежити кількість обслуговуючого персоналу шляхом автоматизації процесу прогнозування і визначення стану дизелів на деякий майбутній певний період часу.

Показано, що більш раціонального підвищення довговічності дизелів ССРС залізниць можна досягти за допомогою зміцнення чи модифікування елементів відповідальних ТС, прискорення процесів припрацювання, якісного та вчасного виконання операцій ТОР. Підвищення довговічності дизелів пов'язано з необхідністю застосування різних способів зміцнення деталей, експлуатаційні властивості яких – зносостійкість, динамічна і циклічна міцність – повинні перевищувати відповідні показники для нових деталей. Тому технологія зміцнення деталі повинна базуватися на застосуванні таких способів і засобів зміцнювальної та механічної обробки, які поряд з високою продуктивністю дозволяють не тільки зберегти, а й суттєво підвищити довговічність деталей. Тому однією з проблем підвищення зносостійкості та довговічності деталей стає розробка нових ефективних і екологічно чистих технологій зміцнення чи модифікування. З усіх технологічних методів підвищення зносостійкості ТС дизелів для створення поверхонь із заданими змінними властивостями теоретично може бути використане лазерне модифікування. Також для підвищення ресурсу дизелів, необхідно звернути увагу періоду припрацювання його відповідальних ТС та внести корективи в ці процеси. При цьому, забезпечити утворення на поверхнях тертя відповідальних ТС ЦПГ та КШМ дизелів плівок чи покриттів, які володіють підвищеними фізико-механічними та триботехнічними властивостями. Стратегія ТОР дизелів повинна володіти оптимальними показниками, що характеризують якість функціонування і експлуатації систем у цілому та відповідальних ТС окремо. Вибір оптимальної стратегії ТОР дизелів ССРС залізниць та впровадження моніторингу їх технічного стану дозволить досягнути високої економічної ефективності за рахунок реорганізації структури системи ТОР та правил експлуатації без залучення додаткових сил і засобів, а раціональне використання їх ресурсу приведе до підвищення техніко-економічних та техніко-експлуатаційних показників.

У другому розділі проведено огляд основних положень щодо визначення довговічності ТС та запропоновано теоретичну оцінку довговічності дизелів.

Проведений теоретичний огляд показав, що значна кількість методів та методик дозволяє визначати ресурс деталей для конкретних умов їх експлуатації, проводити прогнозування, виходячи з експериментальних даних, які отримані в процесі попередніх досліджень. Тобто, системні дані, що включають різні фактори враховуються на 40…60 % і не дають можливості проводити прогнозування залишкового ресурсу окремих ТС чи дизелів у цілому.

На основі термодинамічного аспекту з врахуванням другої варіації ентропії (надмірне виробництво ентропії) отримане рівняння:

$$\frac{\partial^2 E_м}{\partial m \partial t} = 2\frac{\partial^2 A_{зн}}{\partial m \partial t} - \left(\frac{\partial I}{\partial V}V + I\right)^2 (\delta V)^2 \frac{n^2}{D^* T} + \frac{P^2}{T^2 B\lambda}\left(\frac{\partial \mu}{\partial v}v + \mu\right)^2 (\delta V)^2 -$$

$$- Tgrad\frac{\rho}{T}\left(\left(\frac{\partial}{\partial t}\left(\delta\rho_g + \delta V_{gs}\right)\right)^2 + \rho_g V_{gs}\right), \qquad (1)$$

де T – абсолютна температура; μ_i – хімічні потенціали; ρ – потенціал щільності дислокацій; λ – теплопровідність; μ – коефіцієнт тертя; P – сила тиску в контакті; n – об’ємна концентрація частинок; V – нескінченно малий об’єм; I – інтенсивність зносу; v – швидкість ковзання; $A_{зн}$ – площа зносу; D^*– коефіцієнт квазідифузії; ρ_g – середні за об’ємом щільності рухомих дислокацій; v_{gs} – середня швидкість ковзання рухомих дислокацій.

Останній вираз розглянуто більш детально і подано пояснення процесам, які можуть протікати у взаємодіючих поверхнях ТС дизелів у процесах їх експлуатації.

Перший випадок. Якщо в ТС дизелів протікають процеси самоорганізації в повному обсязі, то величини $A_{зн}$ та $I \to 0$. У цьому випадку вираз (1) буде представляти залежність вигляду $E_м = f(V, \rho_g)$.

Далі, наведено залежність енергомасопереносу для протікання процесів самоорганізації в ТС другого рівня на прикладі ТС «колінчастий вал – вкладиш» для конструктивних умов експлуатації дизеля ЯМЗ-238 (рис. 1, а).

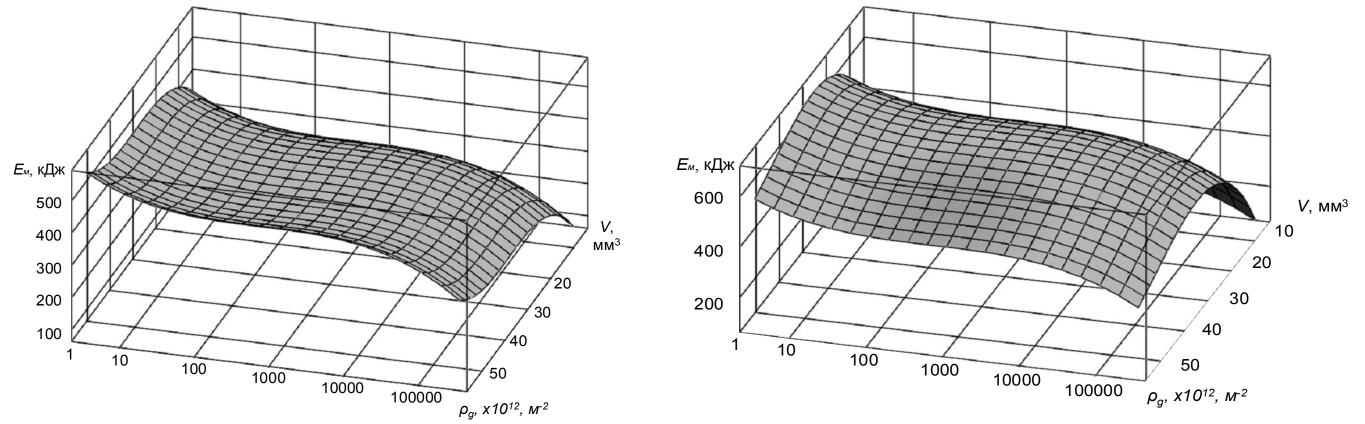
При цьому, інтенсивний енергомасоперенос відбувається при незначному відкачуванні ентропії із зони тертя ТС «колінчастий вал – вкладиш». При поступовому підвищенні щільності рухомих дислокацій, енергомасоперенос мінімізується та прямує до стабільного неврівноваженого стану. При цьому, відбувається «відкачка» ентропії із зони тертя до навколишнього середовища. Об’єм взаємодіючих поверхонь матеріалів ТС, у цьому випадку, має незначний вплив на процеси енергомасопереносу.

Другий випадок. У взаємодіючих поверхнях ТС дизелів другого рівня протікатимуть часткові процеси самоорганізації. Величини намагатимуться досягти значень: $A_{зн} \to \min$, $I \to \min$, а вирішення диференціального рівняння (1) більш складніше, результати якого наведено графічно для ТС «колінчастий вал – вкладиш» при експлуатації дизеля ЯМЗ-238 та при протіканні часткових процесів самоорганізації (рис. 1, б).

У залежності від взаємодіючого об’єму матеріалів сполучених поверхонь ТС «колінчастий вал – вкладиш» при протіканні часткового процесу самоорганізації спостерігаються значні відхилення величини енергомасопереносу. Це вказує на часткову «відкачку» ентропії із зони тертя ТС. Суттєве підвищення щільності рухомих дислокацій призводить до зниження значення та поступової стабілізації величини енергомасопереносу, що є свідченням утворення на взаємодіючих поверхнях тертя стійких вторинних структур.

Третій випадок стосується припущення, що в ТС другого рівня не будуть протікати, навіть, часткові процеси самоорганізації, тому, взаємодіючі поверхні ТС

через деякий незначний час зруйнуються, тобто критичні умови в цьому випадку будуть мати наступний вигляд: $A_{зн} \to \max$, $I \to \max$.



а б

Рисунок 1. Енергомасоперенос у ТС «колінчастий вал – вкладиш» для умов експлуатації дизеля ЯМЗ-238 при протіканні повних (а) та часткових (б) процесів самоорганізації

Остання умова вказує на наступне: або проходження процесів припрацювання або процесів надмірного зносу ТС дизелів. У першому випадку – отримаємо стабілізацію енергомасопереносу, тобто відбудеться перехід до нормальних умов процесу зносу ТС (експлуатації), з можливим наступним переходом до протікання в них часткових процесів самоорганізації. У другому – підвищення ресурсних відмов, зниження ймовірності безвідмовної роботи, надійності та довговічності ТС, вузлів чи дизелів у цілому. Графічна інтерпретація наведена на рис. 2.

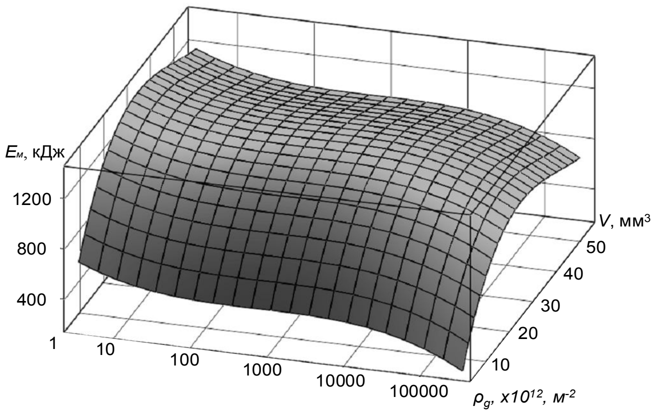


Рисунок 2. Енергомасоперенос у ТС «колінчастий вал – вкладиш» для умов експлуатації дизеля ЯМЗ-238 при протіканні процесів критичного зносу взаємодіючих матеріалів

Наведена графічна залежність вказує на протікання надмірного процесу енергомасопереносу та критичні значення зносу взаємодіючих матеріалів ТС.

Наведені рішення для трьох випадків, на прикладі ТС «колінчастий вал – вкладиш» для умов експлуатації дизеля ЯМЗ-238 довели, що вираз (1) можна вважати критерієм можливості проходження процесів самоорганізації підсистем другого рівня. У виразі (1) враховані технологічні та експлуатаційні фактори роботи ТС, тому в роботі отримано вираз (2), який є критерієм можливості проходження процесів самоорганізації ТС «гільза циліндрів – компресійне кільце» з урахуванням конструктивних параметрів ЦПГ та КШМ дизелів:

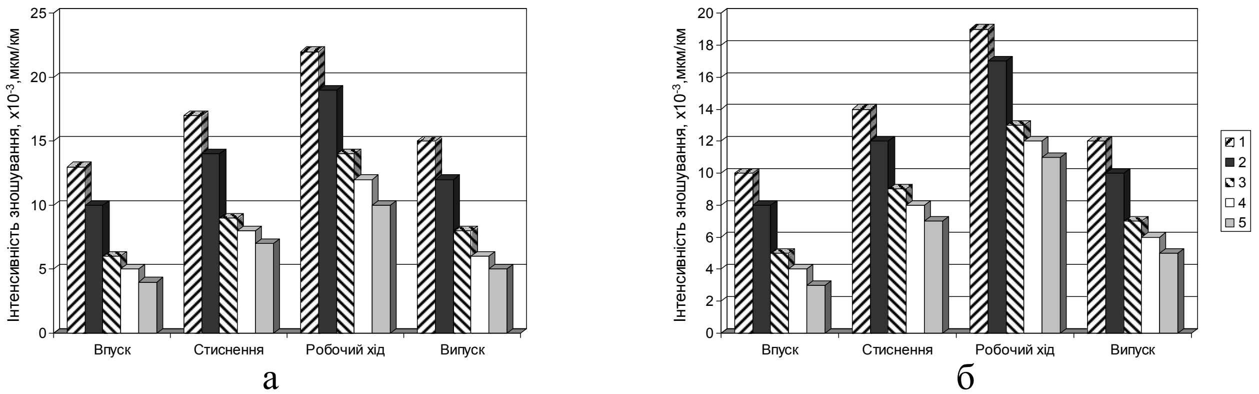
$$\frac{\partial^2 E_м}{\partial m \partial t} = 2\frac{\partial^2 A_{зн}}{\partial m \partial t} - \left(\frac{\partial I}{\partial V}V + I\right)^2 (\delta V)^2 \frac{n^2}{D^* T} + \frac{\left(\frac{\partial \mu}{\partial v}v + \mu\right)^2 (\delta V)^2 p^2}{T^2 B \lambda} \times$$

$$\left(\left[P_г - (m_n + m_1 + m_3 \cdot \frac{l_2}{l}) \cdot j - F_{ko}\right] \cdot \frac{\lambda \cdot \sin\varphi}{\sqrt{1-\lambda^2 \cdot \sin^2\varphi}} - \frac{m_3 \cdot \varepsilon_ш \cdot l_1 \cdot l_2}{l \cdot \sqrt{1-\lambda^2 \cdot \sin^2\varphi}}\right) -$$

$$-Tgrad\,\frac{\rho}{T}\left(\left(\frac{\partial}{\partial t}\left(\delta\rho_g + \delta V_{gs}\right)\right)^2 + \rho_g V_{gs}\right), \qquad (2)$$

де $P_г$ – сила тиску газів на поршень, діюча вздовж вісі циліндра; m_n, m_1, m_3 – відповідно маси поршня, шатуна, які рухаються зворотно-поступально вздовж осі циліндра та маса шатуна, віднесена до його центру мас, що здійснює складний рух; l, l_1 – відповідно загальна довжина шатуна та відстань від центру мас до його верхньої головки ($l_2 = l - l_1$); j – прискорення зворотно-поступального руху поршня; F_{ko} – сила тертя в ТС «гільза циліндрів – компресійне кільце»; λ – відношення радіусу кривошипа до довжини шатуна; φ – кут повороту кривошипа; $\varepsilon_ш$ – кутове прискорення качання шатуна.

Отриманий вираз (2) є єдиним критерієм можливості протікання процесів самоорганізації, тобто утворення дисипативних структур, який вказує, що система втратить стійкість, якщо підвищиться щільність рухомих дислокацій або інтенсивність зносу ТС. Перше, призведе до процесу самоорганізації практично без зносу з утворенням дисипативних структур далеких від врівноважених процесів, а при підвищенні інтенсивності зносу ТС – сягне максимуму, а потім ця інтенсивність різко знизиться з наступним утворенням дисипативних структур. Цей вираз дозволяє розрахувати інтенсивність зносу при застосуванні різних технологічних методів підвищення довговічності дизелів, за яким для дизеля ЯМЗ-238Н при номінальних режимах роботи та на різних тактах роботи (згідно з технічною характеристикою) побудовано теоретичну залежність інтенсивності зносу ТС «гільза циліндрів – компресійне кільце» та «колінчастий вал – корінний вкладиш» (рис. 3).



а б

Рисунок 3. Теоретична залежність інтенсивності зносу ТС «гільза циліндрів – компресійне кільце» (а) та «колінчастий вал – корінний вкладиш» (б) дизеля ЯМЗ – 238 Н при номінальних режимах роботи для різних тактів при застосуванні: 1 – базового варіанту; 2 – пластичної деформації; 3 – лазерного легування; 4 – лазерного модифікування; 5 – іонної імплантації

З графічної інтерпретації видно, що найефективнішими технологічними методами є лазерне легування та модифікування, а також іонна імплантація. При цьому, інтенсивність зносу ТС дизелів знижується в 2 рази і більше.

На основі синергетичного підходу та кінетичної концепції руйнування сполучених матеріалів ТС дизелів запропонована модель:

$$L = \frac{1}{2}\left(\sum_{i=1}^{n} \bar{t}_i \pm \sum_{i=1}^{n} k_{ti}\sigma_{ti} + \sum_{i=1}^{n} t_{pi} P_i(\tau) R_{\tau i}(z) \pm \sum_{i=1}^{n} k_{ti}\sigma_{tpi}\right) K_I + \exp\left(\frac{t}{t_н k}\left(-\int_0^{\infty} \frac{1}{T}\frac{dG}{dT}dt - \right.\right.$$

$$\left.\left. - \int_{-\infty}^{\infty} \ldots \int_{-\infty}^{\infty} P_u \ln P_u dx_1 dx_2 \ldots dx_n + \int_{-\infty}^{\infty} P_w(x_i, t) \ln P_w(x_i, t) dx_i - \sum_{i=1}^{m} P_{\alpha i} \cdot \ln P_{\alpha i}\right) + \frac{t}{t_н}\right), \quad (3)$$

де t – напрацювання, у відповідний момент роботи ТС дизелів; $t_н$ – заплановане напрацювання ТС дизелів; k – коефіцієнт, що враховує інтенсивність роботи ТС дизелів; T – термодинамічна температура; $P_u = P(x_1, x_2, ..., x_n, t)$ – щільність імовірності фазових змінних $x_1, x_2, ...x_n$; $P_w = P(x_i, t)$ – щільність ймовірності стану структур ТС з функціональним станом $x_1, x_2, ...x_i$; P_{0i} – ймовірність неврівноваженого стану структур відповідальної ТС дизелів; t_i – середня тривалість безвідмовної роботи ТС дизелів до повного відновлення технічного стану при проведенні технічного обслуговування та ремонту; k_{ti} – довірчий коефіцієнт, який залежить від області застосування дизелів і закону розподілу його ресурсу на i-му життєвому циклі дизелів; σ_{ti} – середнє квадратичне відхилення на i-му життєвому циклі; t_{pi} – напрацювання між роботами ТОР на i-му життєвому циклі дизелів; n – кількість технічних обслуговувань та ремонтів; σ_{tpi} – середнє квадратичне відхилення напрацювання між роботами ТОР дизелів; $R_{\tau i}$ – ймовірність виконання задачі при ТОР на i-му життєвому циклі дизелів; $P_i(\tau)$ – ймовірність безвідмовної роботи між роботами ТОР на i-му життєвому циклі дизелів; K_I – коефіцієнт, який враховує зміну інтенсивності зносу ТС дизелів, у випадку, коли застосовуються нові матеріали чи технології, які змінюють інтенсивність зносу і напряму свідчить про подовження ресурсу.

Остання модель призначена для прогнозування довговічності дизелів, яка враховує показники безвідмовності, систему ТОР і умови роботи, застосування різних технологічних методів та процеси припрацювання. При цьому, друга частина моделі дозволяє визначати залишковий ресурс дизелів при наявності відомостей про технічний стан відповідальних ТС та інформації про проходження процесів самоорганізації в цих ТС. Лабораторні чи експлуатаційні дослідження в повному обсязі надають інформацію про складові ентропії, що входять до отриманого виразу, а для цілеспрямованого напряму роботи ТС дизелів необхідне проведення модифікування їх сполучених поверхонь, яке буде забезпечувати протікання процесів самоорганізації.

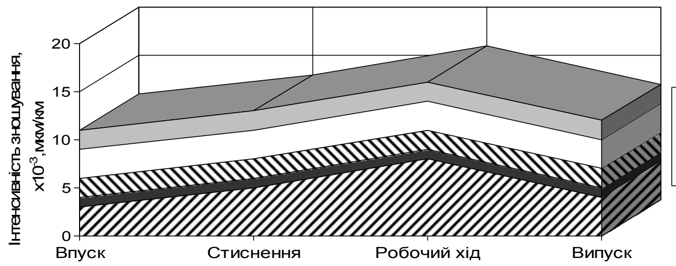
У третьому розділі проведено теоретичне обґрунтування та наведено експериментальне підтвердження застосування лазерного модифікування ТС дизелів ССРС залізниць для підвищення їх довговічності.

Об’єднавши вираз (1) та вираз для визначення максимальної щільності рухомих дислокацій отримано залежність інтенсивності зносу ТС дизелів з урахуванням дислокаційно-вакансійного механізму від параметрів лазерного модифікування та яка наведена графічно (рис. 4):

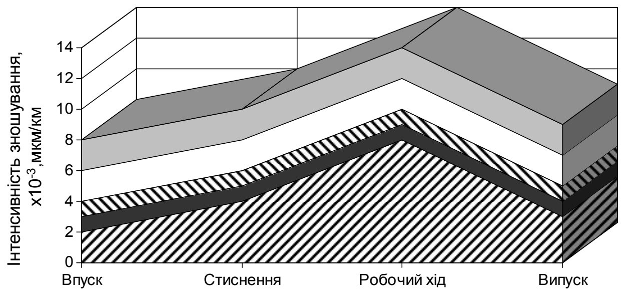
$$I=\frac{1}{n}\sqrt{\frac{\lambda^{*}}{Tv}\sum_{i=0}^{k}a_i\delta^i}\left(\frac{(kPv)^2}{\lambda}+\left(\frac{\chi^2q_0^2K_n^2m^2}{\eta^2\overline{m}^2b^2\lambda^2k_0^2\left(1-\frac{2,5kT}{Gb^3}\ln\frac{\dot{\varepsilon}_0}{\dot{\varepsilon}_i}\right)^2}\times\right.\right.$$

$$\times\left\{\frac{1+\mu}{3\chi\sqrt{\pi\chi t}^{\,2}}F_1\left(\frac{3}{2};2;\frac{5}{2};-\frac{1}{4k_0\chi t}\right)-\sqrt{\frac{t}{\chi\pi}}\frac{2k_0}{1+4k_0\chi t}-\frac{\mu-1}{2\chi}\times\right.$$

$$\left.\left.\left.\times\left[\sqrt{\pi k_0}-\frac{1}{\sqrt{\pi\chi t}^{\,2}}F_1\left(\frac{1}{2};1;\frac{3}{2};-\frac{1}{4k_0\chi t}\right)\right]\right\}^2v_{gs}-\rho_s\cdot v_{sg}\right)D\left(1-\frac{A'C\psi}{k_bT}\right)\frac{\partial C}{\partial x}\right)^{\frac{1}{2}}. \quad (4)$$



а



б

Рисунок 4. Теоретична залежність інтенсивності зносу ТС «гільза циліндрів – компресійне кільце» (а) «колінчастий вал – корінний вкладиш» (б) дизелів ЯМЗ-238 Б при тривалості впливу лазерного випромінювання 1 с та густини потужності, Вт/м^2: 1 – 10^4; 2 – 10^6; 3 – 10^8; 4 – 10^9; 5 – 10^{10}

Лазерне модифікування поверхонь ТС дизелів дозволяє зменшити величину їх інтенсивності зносу та досягти проходження процесів самоорганізації у їх сполученні, тобто досягти майже беззносного стану.

Для кожного сполучення і властивих йому умов тертя існує визначена оптимальна контурна площа контактування, що представляє собою сукупність плям контакту, оптимально розташованих на номінальній площі. Тому, було запропоновано вираз для визначення мікрогеометрії ТС при лазерному впливі на неперервному режимі:

$$R_{max}=\frac{\overline{\rho}\alpha q_0K_nE}{2\lambda k_0Vf}\frac{\sqrt{\pi k_0}}{2}F_1\left(\frac{1}{2};2;-k_0r^2\right). \quad (5)$$

Оскільки, найбільшого припрацювання в дизелях зазнають гільзи циліндрів, та виходячи з того, що в сучасності широкого розповсюдження набули дизелі сімейства ЯМЗ, то, у відповідності до цього, побудовано графічні залежності висоти мікронерівностей від густини потужності лазерного випромінювання (рис. 5).

З теоретичної залежності видно, що оптимальна густина потужності лазерного випромінювання лежить у межах 2…3·10^8 Вт/м^2 при різних швидкостях подачі деталі.

Оскільки знос гільзи циліндрів відбувається нерівномірно (найбільшого зносу зазнає її верхня частина), то для визначення потрібної густини потужності лазерного випромінювання проведено моделювання робочих температур та процесів, що виникають при роботі дизелів, а аналіз технологічних методів засвідчив, що основним елементом для модифікації може виступати вуглець.

Тому, в даній роботі запропоновано використовувати для модифікування вуглекислий газ чи природний графіт з модифікатором ніобієм. Для цього запропоновані схеми модифікування робочих поверхонь ТС дизелів з подачею вуглекислого газу та природного графіту з ніобієм у зону лазерного опромінення та технологічний процес лазерного модифікування гільз циліндрів дизелів, який необхідно виконувати у режимі автоматичного керування, задаючи параметри відповідно до побудованої залежності (рис. 6).

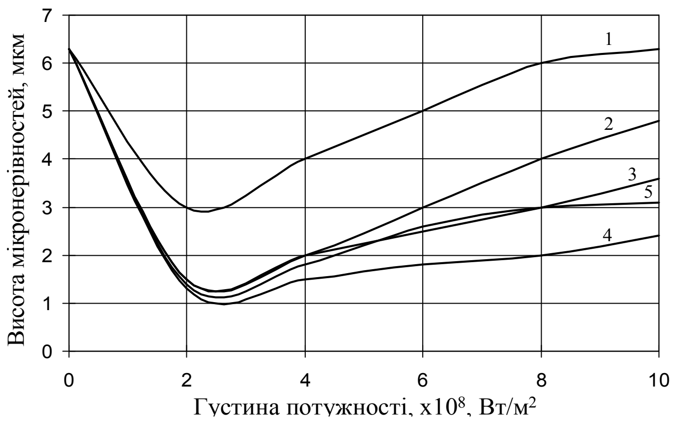


Рисунок 5. Теоретична залежність висоти мікронерівностей поверхні чавуну СЧ-12 від густини потужності лазерного випромінювання при швидкості: 1 – 5 мм/с; 2 – 10 мм/с; 3 – 15 мм/с; 4 – 20 мм/с; 5 – 25 мм/с

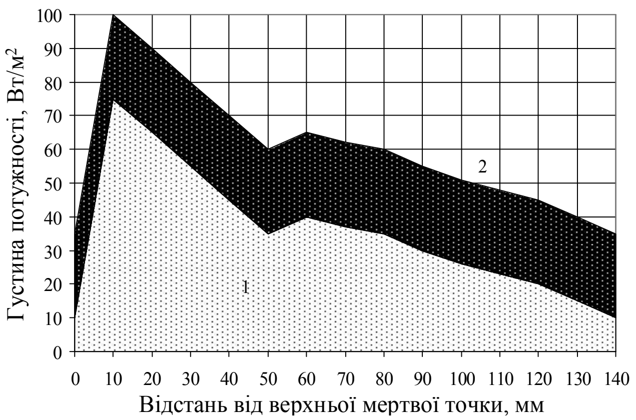


Рисунок 6. Технологічні параметри лазерного модифікування гільз циліндрів дизелів: 1 – область мінімальних значень; 2 – область номінальних значень

Лазерне модифікування шийок колінчастих валів дизелів необхідно проводити відповідно до епюр зносу з дискретним значенням густини опромінення за твірними шийок.

Після якісних позитивних результатів лабораторних досліджень зразків для підтвердження адекватності отриманих результатів було застосоване лазерне модифікування робочих поверхонь гільз циліндрів та шийок колінчастих валів дизелів ЯМЗ-236 та ЯМЗ-238 на оптимальних режимах та проведені їх експлуатаційні дослідження на автомотрисах та дрезинах, що належать Одеській залізниці на протязі 2007-2011 рр. Установлено зниження інтенсивності зносу ТС у 2…5 рази із забезпеченням у процесі подальшої експлуатації дизелів низької інтенсивності їх зносу.

Техніко-експлуатаційні параметри дизелів наведені в паспортах. Але виникла необхідність у встановлені динаміки зміни цих параметрів при різних значеннях напрацювання ССРС залізниць під час експлуатації, особливо, це стосується динаміки для дизелів з модифікованими ТС. За результатами експлуатаційних досліджень технічних параметрів дизелів ЯМЗ, що встановлені на ССРС залізниць у

залежності від напрацювання були визначені основні середньостатистичні показники.

Характерним показником протікання процесів тертя виступає показник механічних втрат у дизелі. Встановлено, що при нижчій температурі моторного масла, значення величини механічних втрат у дизелі вище в 1,1…2,4 рази.

Пуски дизелів ССРС залізниць складають 10…30 пусків на добу. При цьому відбувається значне відхилення значень показників. Тому, для забезпечення довговічності обґрунтовано прийоми використання дизелів на етапах пуску, прогрівання, експлуатаційного режиму і зупинки. Пуск дизелів обумовлений нагрівом повітря в циліндрах в кінці такту стиснення. Температура повітря в кінці такту стиснення залежить від тиску і температури навколишнього середовища, частоти обертання колінчастого валу, а також від зносу ЦПГ дизелів. В останньому випадку знижується тиск і підвищується пускова частота обертання колінчастого валу дизелів, тобто мінімальна частота обертання колінчастого валу, при якій можливий надійний пуск.

При значному зносі ЦПГ під час стиснення частина повітря з циліндра проходить через зазори в картер. В результаті знижуються значення тиску, а отже, і температури повітря в кінці такту стиснення. У цьому випадку, частота обертання колінчастого валу дизелів повинна бути достатньо велика. В іншому випадку значна частина тепла, яке виділилося при стисненні повітря, передається через стінки циліндрів охолоджуючій рідині. При цьому знижуються значення тиску і температури. При подальшому збільшенні зносу ТС ЦПГ пуск дизелів неможливий.

Істотно впливає на можливість пуску наявність масла на стінках гільз циліндрів дизелів. Масло сприяє герметизації циліндра і значно знижує знос його стінок. При лазерному модифікуванні ТС дизелів з використанням природного графіту та вуглекислого газу забезпечується затримка стікання масла зі стінок гільз циліндрів, що сприяє швидкому пуску дизелів та зниженню зносу під часу пуску в 7…10 разів. Це доводять результати, що наведені на рис. 7. Дані свідчать про менший час необхідний для пуску дизелів ССРС залізниць при модифікованих ТС особливо при низьких температурах моторного масла. Протягом декількох хвилин після пуску дизелів ССРС залізниць характер зносу підвищений та перевищує стале значення на експлуатаційних режимах у кілька разів. Це пояснюється поганими умовами мастила поверхонь в початковий період роботи дизелів. На рис. 8 наведена залежність швидкості зносу ТС дизелів від їх часу роботи після пуску.

Таким чином, для забезпечення надійного пуску при різних температурах моторного масла, мінімального зносу ТС дизелів і забезпечення найбільшої довговічності при експлуатації слід застосовувати лазерне модифікування ТС вуглекислим газом чи природним графітом з ніобієм.

Прогрів дизелів ССРС залізниць характеризується його роботою без навантаження з поступовим підвищенням температури моторного масла до експлуатаційних значень. При більш низьких температурах кількість масла в дизелях при базовому варіанті буде недостатньою, що не виключить можливість пошкодження поверхонь тертя ТС (підплавлення підшипників, задири гільз циліндрів). Модифікування сполучених поверхонь ТС дизелів вуглекислим газом чи природним графітом з ніобієм дає можливість уникнути таких пошкоджень під час

пуску при низьких температурах, оскільки модифікування забезпечує тверде мащення в ТС дизелів.

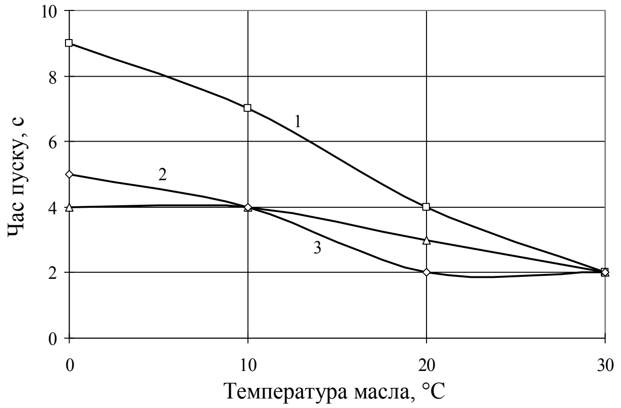


Рисунок 7. Середній час пуску дизелів ССРС залізниць у залежності від температури моторного масла при:
1 – базовому варіанті;
2 – модифікованих ТС вуглекислим газом; 3 – модифікованих ТС природним графітом з ніобієм

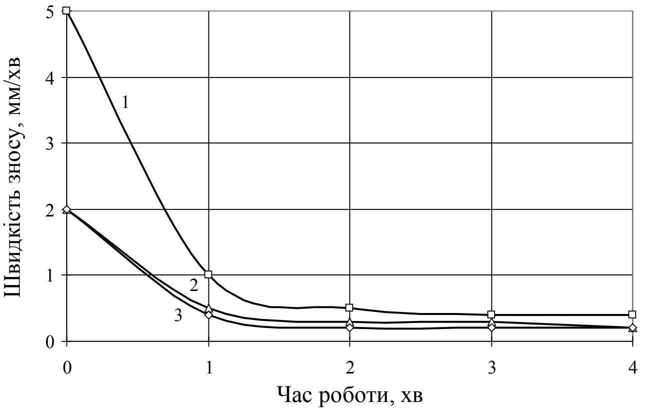


Рисунок 8. Характер зміни швидкості зносу ТС дизелів після пуску при:
1 – базовому варіанті;
2 – модифікованих ТС вуглекислим газом; 3 – модифікованих ТС природним графітом з ніобієм

Згідно отриманих даних, встановлено, що при температурі масла нижче 20°С частота обертання колінчастого валу заводських дизелів не повинна перевищувати 1200 об/хв., тобто дизелі повинні прогріватися при поступовому збільшенні частоти обертання колінчастого валу у міру підвищення температури масла. При модифікованих ТС дизелів ССРС залізниць, майже на будь-яких швидкісних і навантажувальних режимах такий дизель може експлуатуватися практично без підвищеного зносу.

Характерним показником ступеня зношення відповідальних ТС дизелів є залежність витрати масла на угар від напрацювання (рис. 9). Причому при стрімкому збільшенні витрат масла на угар можна стверджувати, що величина спрацювання відповідальних ТС ЦПГ знаходиться на критичному рівні. Також, ступінь спрацювання ТС ЦПГ дизелів можна характеризувати за величиною прориву газів у картер дизелів (рис. 10).

Як видно, при модифікованих гільзах циліндрів знос компресійних кілець дизелів ЯМЗ-238Б майже не впливає на величину прориву газів у картер, тобто зазор ТС «гільза циліндрів – компресійні кільця» практично не змінюється.

Зміна швидкісного режиму впливає на процеси сумішоутворення і згоряння, а також на механічні і температурні навантаження ТС дизелів. В умовах швидкісної характеристики дизелів ССРС залізниць при підвищенні частоти обертання колінчастого валу швидкість зносу ТС збільшується. Це викликано підвищенням температури у сполучених поверхнях ТС ЦПГ та КШМ дизелів, а також збільшенням динамічних навантажень і сил тертя. При зменшенні частоти обертання колінчастого валу нижче заданої межі швидкість зносу може зростати у зв’язку з погіршенням гідродинамічного режиму мащення. Зміна питомого зносу ТС

«колінчатий вал – вкладиш» дизелів залежно від частоти обертання валу така сама як і для ТС ЦПГ. Мінімальний знос спостерігається в діапазоні 1300...1500 об/хв. Підвищений знос на великій частоті обертання колінчастого валу пояснюється збільшенням тиску на опори, температури робочих поверхонь і змащувального матеріалу, на малій частоті обертання – погіршенням умов роботи масляного клина в ТС дизелів. Таким чином, при модифікованих ТС дизелів вуглекислим газом чи природним графітом існує оптимально-швидкісний режим, при якому питомий знос основних елементів буде мінімальним, а довговічність дизелів – максимальною.

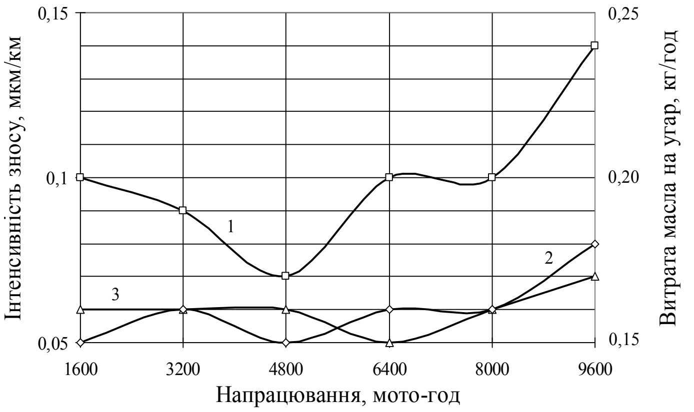


Рисунок 9. Залежність інтенсивності зносу ТС ЦПГ дизелів та витрати масла, що надходить на угар від напрацювання при: 1 – базовому варіанті; 2 – модифікуванні вуглекислим газом; 3 – модифікуванні природним графітом з ніобієм

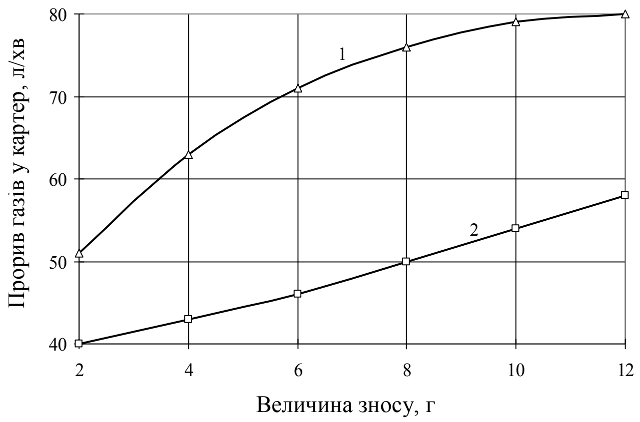


Рисунок 10. Вплив величини зносу компресійних кілець на прорив газів у картер дизелів ЯМЗ-238Б при: 1 – немодифікованих ТС; 2 – модифікованих гільзах циліндрів природним графітом з ніобієм

Температурний режим роботи дизелів ССРС залізниць в експлуатації можна оцінити по температурі охолоджуючої рідини або масла. Перегрів дизелів викликає пониження в'язкості масла, деформацію деталей, зрив оливної плівки, що веде до підвищення зносу деталей. З паспортних даних відомо, що існує оптимальний режим температури охолоджуючої рідини (70…90°С) при якому знос дизелів є мінімальним. Тому, були проведені дослідження зносу в інтервалі температур робочої рідини 60…100°С. Результати сумарного зносу дизелів у залежності від температури охолоджуючої рідини наведені на рис. 11. Крім того, значний вплив на інтенсивність зносу гільз циліндрів дизелів здійснюють корозійні процеси. При низьких температурах рідини та масла дизелів, окремі ділянки поверхні гільз циліндрів зволожуються конденсатом, що містить продукти згоряння сірчаних з'єднань дизельного пального й інші корозійно-активні гази. В результаті протікає процес хімічної корозії з утворенням оксидів, що сприяє інтенсивному корозійно-механічному зношуванню ТС «гільза циліндрів – кільце». Результати зносу гільз циліндрів дизелів ЯМЗ-238Б в залежності від температури стінки гільзи наведено на рис. 12.

Дослідження характеру зносу ТС дизелів ССРС залізниць на несталих режимах їх роботи показали, що знос гільз циліндрів, поршнів і кілець, вкладишів корінних і шатунних підшипників, на цих режимах збільшується понад 20 %. Основними причинами, що викликають збільшення інтенсивності зносу ТС дизелів

на несталих режимах в порівнянні із сталими, є: підвищення інерційних навантажень, погіршення умов роботи масла і її очищення, порушення нормального протікання процесу згоряння палива. Як показано вище, не можна виключати перехід від рідинного тертя до граничного з розривом масляної плівки, а також збільшення корозійного зносу. Таким чином, при експлуатації ССРС залізниць з немодифікованими ТС дизелів необхідно забезпечувати постійність режиму їх роботи. Якщо це неможливо, то переходи з одного режиму на іншій слід робити плавно, що в умовах залізничного господарства майже неможливо. При експлуатації ССРС залізниць модифіковані ТС дизелів забезпечують та задовольняють умови роботи на дистанціях енергопостачання та колії. Це сприяє підвищенню довговічності дизелів та ССРС у цілому, а також ефективності їх використання.

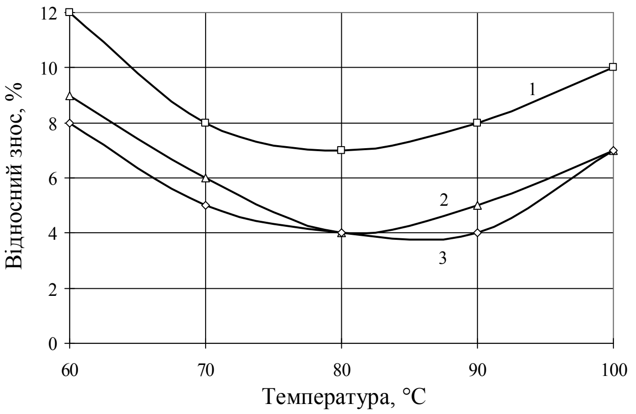


Рисунок 11. Відносний знос ТС дизелів ЯМЗ-238Б в залежності від температури охолоджуючої рідини при: 1 – базовому варіанті; 2 – модифікованих ТС вуглекислим газом; 3 – модифікованих ТС природним графітом з ніобієм

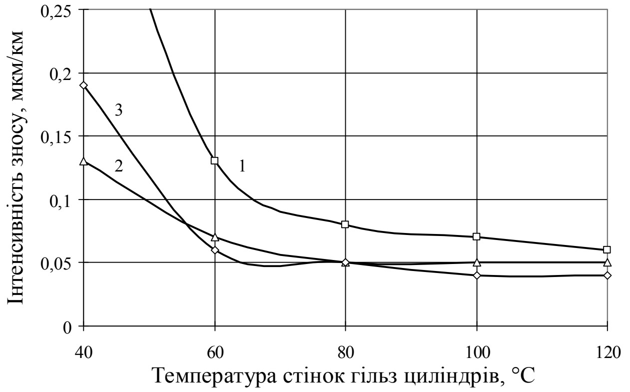
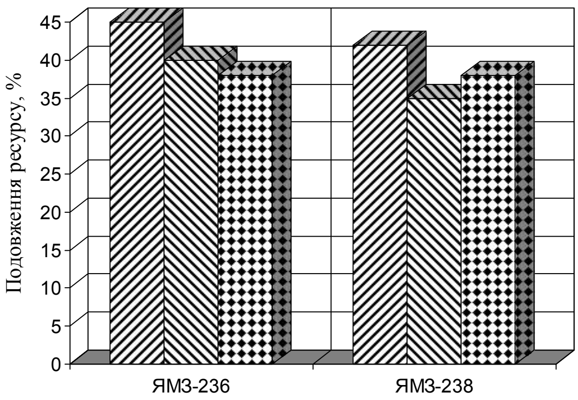


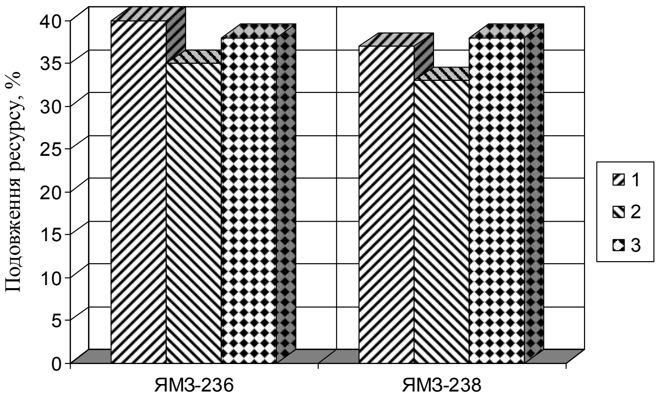
Рисунок 12. Вплив температури стінок гільз циліндрів дизелів ССРС на інтенсивність їх зносу при: 1 – базовому варіанті; 2 – модифікованих ТС вуглекислим газом; 3 – модифікованих ТС природним графітом з ніобієм

Мінімальна витрата палива дизелів ССРС залізниць залежно від навантажувально-швидкісного режиму роботи співпадає з режимом мінімального зносу його ТС. Збільшення питомої витрати палива обумовлюється підвищенням інтенсивності зносу ТС дизелів, в основному, тим, що не в повному обсязі згоряє паливо і через збільшення моменту тертя в ТС через нестачу масла чи її забруднення. Холодний дизель або його підвищений нагрів супроводжується тепловими деформаціями деталей і порушенням процесів згоряння, що також приводить до перевитрати палива.

Використавши експериментальні дані, що отримані при експлуатаційних дослідженнях, а також теоретичну залежність, в якій враховано всі величини отримані при експериментальних дослідженнях встановлено подовження ресурсу ТС дизелів, а також подовження ресурсу дизелів у цілому (рис. 13, 14).



а



б

Рисунок 13. Подовження ресурсу ТС дизелів модифікованих лазерним випромінюванням з подачею вуглекислого газу (а) та природного графіту (б): 1 – «кільце – гільза»; 2 – «вкладиш – вал»; 3 – теоретичне усереднене значення

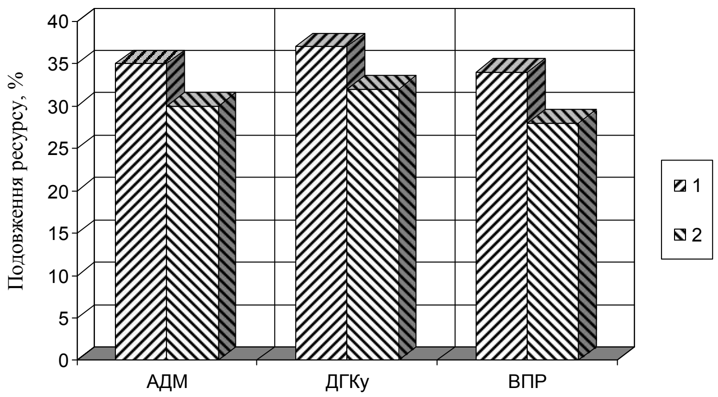


Рисунок 14. Подовження ресурсу дизелів сімейства ЯМЗ ССРС залізниць при використані модифікованих ТС лазерним випромінюванням: 1 – з подачею вуглекислого газу; 2 – з подачею природного графіту

У четвертому розділі наведено теоретичне обґрунтування та експериментальне підтвердження впливу прискорення процесу припрацювання ТС дизелів ССРС залізниць для підвищення їх довговічності.

Для процесу припрацювання запропоновано вираз для інтенсивності зносу ТС дизелів:

$$I_{np} = \frac{1}{n}\sqrt{\frac{\lambda^*}{Tv}\sum_{i=0}^{k} a_i \delta^i}\sqrt{\frac{(kPv)^2}{\lambda} + \rho_s \cdot v_{sg} \cdot grad\rho}\,. \tag{6}$$

У цьому випадку можна записати нерівність:

$$I_{np} > I\,, \tag{7}$$

яка свідчить, що ТС дизелів в процесі припрацювання намагаються зменшити та досягти майже постійної інтенсивності зносу, тобто відбувається процес пристосування в ТС.

Використавши диференціальне рівняння, що описує кількість поглинутої трибопроцесом механічної енергії та вираз (6), було отримано залежність інтенсивності зносу ТС дизелів ССРС залізниць в процесі припрацювання:

$$I_{np} = \frac{I_0 \exp\left(-\frac{L}{L_{np}}\right)}{\exp\left(-\frac{L}{L_{np}}\right) - 1} - \frac{\frac{1}{n}\sqrt{\frac{\lambda^*}{Tv}\sum_{i=0}^{k} a_i \delta^i}\sqrt{\frac{(kPv)^2}{\lambda} - \left(\rho_g \cdot v_{gs} - \rho_s \cdot v_{sg}\right)D\left(1 - \frac{A'C\psi}{k_b T}\right)\frac{\partial C}{\partial x}}}{\exp\left(-\frac{L}{L_{np}}\right) - 1}. \qquad (8)$$

Область однорідних процесів обмежена, з одного боку, метастабільними станами, коли швидкість чи навантаження дорівнюють нулю, а з іншого боку – таким поєднанням швидкостей і навантажень, при якому виникають аномальні явища схоплювання, задиру, заклинювання. Причиною цього є порушення динамічної рівноваги між вільною енергією і ентропією. Зростання ентропії приводить до збільшення рухомості елементів дисипативної структури і зниження несучої здатності. Збільшується при цьому розмір і кількість площинок безпосереднього контакту твердих тіл, а також розмір часток, що відділяються. При досягненні критичних розмірів частки, попадають в зону контакту, не диспергують, а викликають відділення подібних часток. ТС вирішальним чином впливають на надійність і довговічність дизелів, оскільки розвиток аномальних явищ приводить до аварійних і катастрофічних ситуацій. В зв'язку з цим визначення меж області однорідних процесів є надзвичайно важливою задачею. Визначення меж області відповідає рідким подіям і статистичним методам не підкоряється. Більш ефективний підхід використовує суб'єктивну логіку у поєднанні з Байєсовським розрахунком. Використовуючи сучасні засоби технічної діагностики, можна з великою точністю визначити розвиток аномальних явищ на ранній стадії. Уявлення про дисипативні структури та їх руйнування дозволяє виробити загально діагностичні ознаки зміни стану ТС. При додаванні присадок до моторних масел дизелів, можна досягти прискореного процесу припрацювання, час якого зменшується у 1,5…2,0 рази. Тому, в даній роботі запропоноване використання природного графіту з додаванням модифікатора – ніобію. Природний графіт додавали до моторного масла та повітря, що поступає у камеру згоряння циліндрів дизелів. Природний графіт у моторному маслі з ніобієм при експлуатації дизелів ССРС залізниць дифундує в стальну матрицю колінчастого валу та в чавунну – гільзи циліндрів. Ідентифікаторами такого процесу виступають ніобій та процеси тертя. Останні призводять до підвищення температури в зоні контакту «вал – вкладиш», а в ТС «гільза – кільце» моторне масло разом із спалахом робочої суміші спричиняють протікання дифузійних процесів. Подача природного графіту з модифікатором до камери згоряння відбувалася наступним чином. У такті впуску дизелів, разом з повітрям порційно подавали природний графіт з модифікатором. У такті стиснення відбувається суттєве підвищення температури. В результаті такого підвищення, спочатку, відбувається процес дифузії – впровадження природного

графіту у чавунну поверхню гільз циліндрів. При подальшому підвищенні температури відбувається хімічна взаємодія природного графіту з чавунною поверхнею. Така взаємодія протікає, завдяки модифікатору. У ролі модифікатора пропонується застосовувати ніобій. Через декілька хвилин роботи дизеля, робоча поверхня гільзи циліндра досягає необхідної шорсткості, яка дозволяє не проводити процес припрацювання та подати дизель до експлуатації у номінальних режимах. Отримана шорсткість поверхонь гільз циліндрів дизелів надала можливість подолати інтенсивний режим зносу, що відбувається в процесі припрацювання.

Експлуатаційні дослідження проведені на ССРС, що приписаний до ст. Знам'янка Одеської залізниці підтвердили теоретичні передумови зниження величини та інтенсивності зносу ТС. Крім того, доведено, що середній знос гільз циліндрів за робочою висотою із додаванням природного графіту з ніобієм до моторного масла стає рівномірно розподіленим, а середній знос компресійних кілець знижується майже в 3 рази.

При експлуатаційній модифікації характер зносу гільз циліндрів дизелів різко відрізняється від інших випадків, а якщо проводити подачу природного графіту з ніобієм до камери згорання постійно з деякими інтервалами, то в цьому випадку спостерігається значне зниження зносу гільз циліндрів та його рівномірне розподілення за робочою довжиною.

Для виявлення впливу модифікатора на технічні показники спочатку припрацювання і при наступній експлуатації були проведені дослідження механічних втрат у дизелі ЯМЗ-238 у залежності від напрацювання. При цьому встановлено, що при використанні модифікатору природного графіту з ніобієм з моторними маслами SAE 10W-40 та М10$Г_2$ прискорюється процес припрацювання ТС і забезпечується значне зниження механічних втрат у системах дизелів. Установлено, що зниження механічних втрат у ТС дизелів чи підтримання їх на одному рівні можливе тільки при умові додавання модифікатору до масел через одне-два ТО-2 при виконанні операцій ТОР.

Для більш явного та ймовірного уточнення зміни властивостей моторного масла з модифікатором для визначення необхідного часу його заміни, тобто терміну проведення ТО-2 дизелів ССРС залізниць були проведені дослідження зміни концентрації продуктів зносу в моторному маслі за допомогою методу спектрального аналізу, які вказують на те, що заміну масла можна проводити мінімум на 150 мото-год пізніше, ніж установлена норма при ТО-2 ППС ТОР.

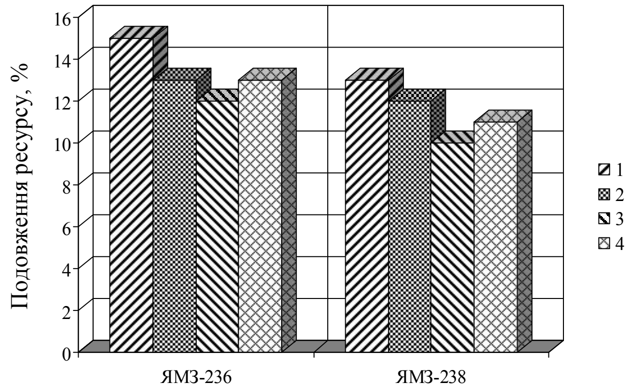
Експлуатаційну модифікацію проводили з подачею природного графіту до камери згоряння дизелів. З підвищенням температури в'язкість масла падає, а значить і знижується товщина несучого шару масла на поверхнях тертя ТС, що працюють у режимі гідродинамічного мащення. Як тільки товщина плівки стає рівною середньому розміру частинок пластинчатого графіту, присутнього в маслі, шар рідини розривається і режим мащення з гідродинамічного переходить в граничний: тертя зростає.

Для встановлення оптимального розміру фракцій природного графіту, що застосовується при експлуатаційній модифікації для прискорення процесу припрацювання ТС ЦПГ і забезпечення подальших нормальних умов експлуатації дизелів ССРС залізниць було проведено серію експериментів, які полягали у

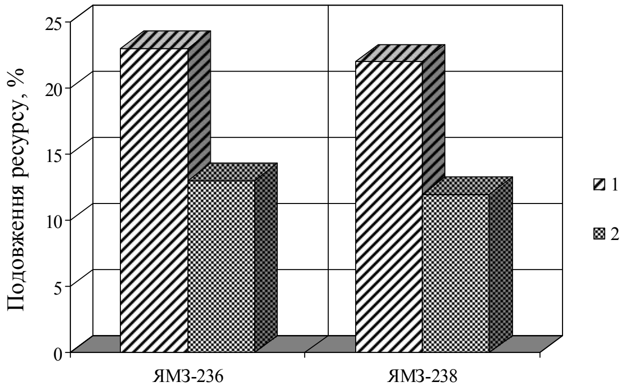
дослідженні зміни механічних втрат при поступовому напрацюванні. При використанні природного графіту для експлуатаційної модифікації дизелів фракцією 10…50 мкм, механічні втрати на 11…18 % нижче в порівнянні з базовим варіантом, але найбільш прийнятним розміром фракції природного графіту є 10 мкм, оскільки при цьому значенні забезпечуються оптимальні техніко-експлуатаційні та техніко-економічні показники. Показана можливість продовження експлуатації моторного масла дизелів до 700 мото-год, оскільки концентрація продуктів зносу не перевищує граничні значення. Але при проведенні ТО-2, тобто при заміні масла швидкість зносу ТС «гільза циліндрів – компресійні кільця» менше в 1,5…3,0 рази у порівнянні з тим, коли не проводиться заміна масла.

Проведені дослідження вказали на те, що прискорення процесів припрацювання ТС дизелів ССРС залізниць дозволяє підвищити якість їх роботи, тобто техніко-експлуатаційні показники, надійність та довговічність їх у цілому. Якісний процес припрацювання ТС дизелів дозволяє зменшити механічні втрати на тертя, крім того прибрати I етап роботи дизелів (припрацювання) та почати нормальну експлуатацію з майже постійним зносом. У випадку додавання природного графіту з модифікатором до моторного масла та з введенням до камери згоряння дизелів ССРС залізниць знос має меншу величину під час нормальної експлуатаційної роботи.

Для оцінки впливу прискорення процесу припрацювання на довговічність дизелів ССРС залізниць отримані порівняльні теоретичні та експериментальні розрахунки подовження ресурсу. Теоретичні розрахунки будувались на основі виразу (1), а інтенсивність зносу в процесі припрацювання розраховувалась за виразом (8) з урахуванням деяких результатів робіт. Побудована діаграма (рис. 15, а) є результатом розрахунків подовження ресурсу дизелів ССРС залізниць при прискоренні процесу припрацювання їх ТС з додаванням до моторного масла природного графіту з ніобієм. Також, у випадку прискорення процесу припрацювання при експлуатаційній модифікації, побудовано діаграму подовження ресурсу (рис. 15, б).



а



б

Рисунок 15. Подовження ресурсу ТС дизелів «гільза циліндрів – компресійне кільце» (1, 2) та «корінний вкладиш – шийка колінчастого валу» (3, 4) з додаванням природного графіту з ніобієм до моторного масла: 1, 3 – експериментальні розрахунки; 2, 4 – теоретичне значення

Отримані дані для ТС дизелів при різних способах прискорення їх припрацювання були усереднені для дизелів у цілому та наведені у вигляді порівняльної діаграми для різних ССРС залізниць (рис. 16).

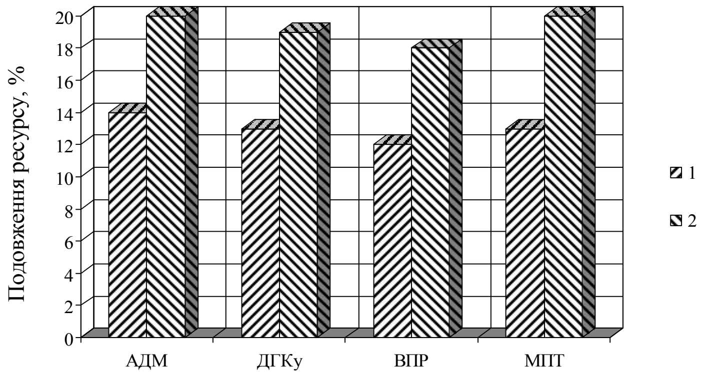


Рисунок 16. Подовження ресурсу дизелів ССРС залізниць при прискоренні процесу припрацювання ТС: 1 – з додаванням природного графіту до моторного масла; 2 – з подачею природного графіту до камери згоряння

У п'ятому розділі наведено результати впливу проведення ТОР дизелів на їх довговічність. Запропоновано графічну залежність проведення операцій ТОР та їх вплив на ймовірність безвідмовної роботи дизелів ССРС залізниць (рис. 17).

З графічної інтерпретації взаємозв'язку ймовірності безвідмовної роботи та виконання операцій ТОР дизелів видно, що завжди можна досягти високого рівня їх надійності та довговічності. При цьому, для підвищення довговічності дизелів можна та необхідно виконувати операції ТОР раніше, а інколи пізніше, ніж наведено на рис. 17

Тобто, для встановлення часу проведення операцій ТОР необхідно володіти інформацією про технічний стан дизелів ССРС залізниць. Вчасне та якісне проведення операцій ТОР дизелів дозволяють забезпечити високу ймовірність їх безвідмовної роботи. Наведена графічна інтерпретація області взаємозв'язку ймовірності безвідмовної роботи та виконання операцій ТОР дизелів відображає можливість підвищення їх довговічності. Для цього, необхідно виконувати операції ТОР раніше, а інколи пізніше, та володіти постійною інформацією про технічний стан дизелів.

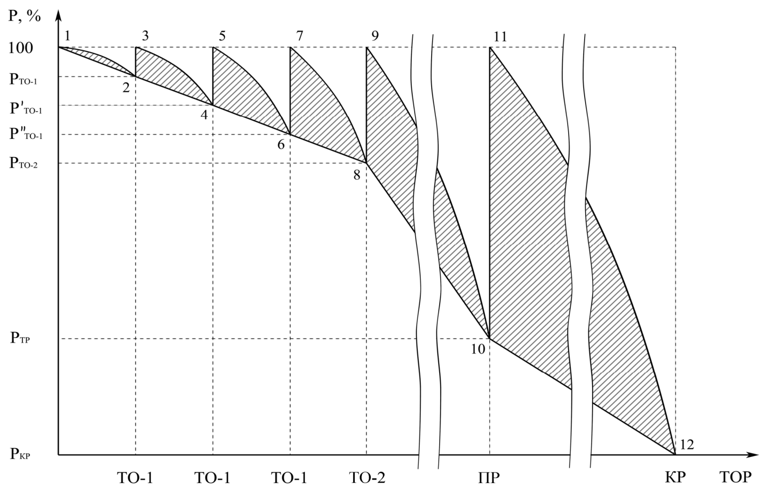


Рисунок 17. Ймовірність безвідмовної роботи дизелів ССРС залізниць при виконанні операцій ТОР

Терміни проведення ТОР дизелів ССРС залізниць описано з математичної точки зору основних складових надійності та отримано модель, яка включає:

ймовірність виконання задачі:

$$R_{\tau}(z)=(\tau-\int_0^{\tau}\int_0^{x}F(x-y)d\Phi(y)dx+(M\gamma_3-M\gamma_2))\int_0^{\tau}F(\tau-x)d\Phi(x)+M\gamma_1+$$

$$+(M\gamma_2-M\gamma_1)F(\tau))^{-1}\int_0^{\tau}\overline{F}(x+z)dx; \qquad (9)$$

коефіцієнт готовності:

$$K(\tau)=R_{\tau}(0); \qquad (10)$$

ймовірність безвідмовної роботи:

$$P(\tau)=\frac{\int_0^{\tau}F(x)dx-\int_0^{\tau}\int_0^{x}F(x-y)d\Phi(y)dx+\left(M\gamma_3+M\gamma_2\right)\int_0^{\tau}F(\tau-x)d\Phi(x)}{\int_0^{\tau}\overline{F}(x)dx}+$$

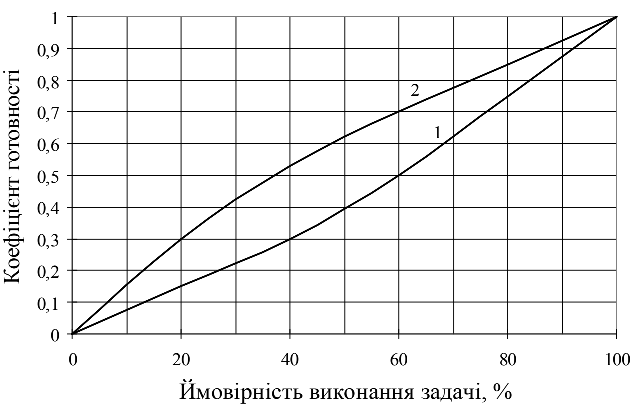
$$+\frac{M\gamma_1+(M\gamma_2-M\gamma_1)F(\tau)}{\int_0^{\tau}\overline{F}(x)dx}. \qquad (11)$$

Останні рівняння (9-11) призначені для визначення оптимального періоду проведення ТОР дизелів, а оптимальні значення критеріїв якості для окремих випадків індикації відмов можуть мати стаціонарні рішення: випадок миттєвої індикації:

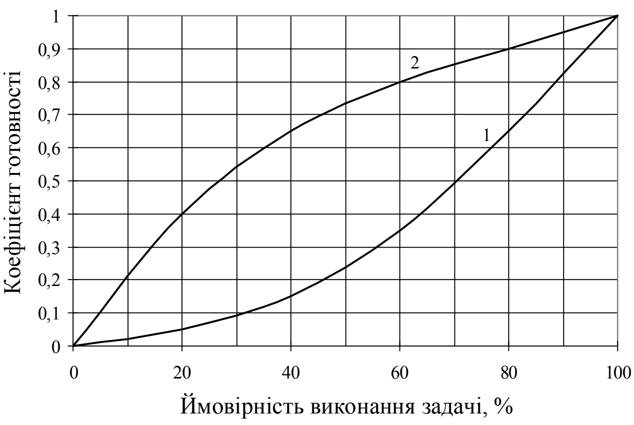
$$\Phi(x)=\begin{cases}0, x<0,\\1, x\geq 0,\end{cases} \qquad (12)$$

і випадок відсутності самостійного прояву відмов: $\Phi(x)=0$ для $x<\infty$.

Для окремих випадків індикації відмов дизелів на рис. 18 наведено залежності коефіцієнту готовності ССРС залізниць від ймовірності виконання задач при ТО та КР.



а



б

Рисунок 18. Залежність коефіцієнту готовності ССРС залізниць від ймовірності виконання задач при ТО-2 (а) та КР (б) дизелів у випадку: 1 – миттєвої індикації відмов; 2 – відсутності самостійного прояву відмов

На рис. 19 приведено залежність коефіцієнту готовності ССРС залізниць від ймовірності безвідмовної роботи дизелів для окремих випадків індикації їх відмов.

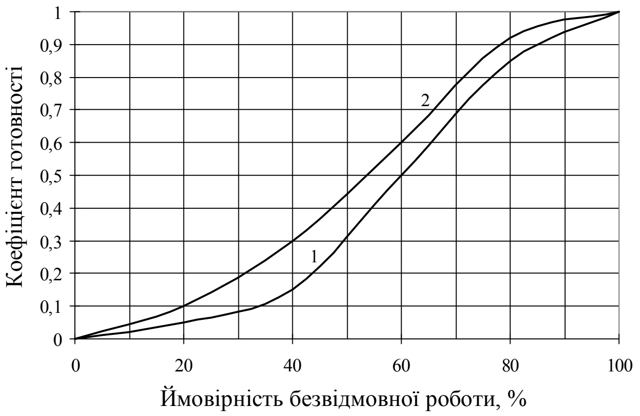


Рисунок 19. Залежність коефіцієнту готовності ССРС залізниць від ймовірності безвідмовної роботи дизелів у випадку: 1 – миттєвої індикації відмов; 2 – відсутності самостійного прояву відмов

При виборі оптимальних термінів проведення ТОР дизелів ССРС залізниць необхідно враховувати повноту інформації, що належить до категорії відмов відповідальних ТС. При дослідженні моделей профілактичного обслуговування, в яких значну роль грає структура системи, основна проблема полягає у визначенні оптимальної глибини профілактики, тобто обсягу тієї частини системи, яка підлягає оновленню (заміні) при проведенні ремонтних робіт. У багатьох випадках характеристиками дизелів є напрацювання окремих елементів чи ТС, а для математичного опису їх функціонування використовується апарат напівмарківських процесів.

Відповідно до виразу (1) та прийнявши до уваги залежність (9) графічно показано вплив ймовірності виконання задачі при ТОР дизелів на їх довговічність для окремих випадків індикації відмов ТС при ТО та КР (рис. 20). Спостерігається відносне підвищення довговічності дизелів ССРС залізниць (у середньому до 20 %) для різних випадків індикації відмов ТС при забезпеченні 100 %-го значення ймовірності виконання поставленої задачі під час проведення ТОР. Урахувавши вираз (10) при зміні ймовірності безвідмовної роботи дизелів під час експлуатації на основі залежності (1) покажемо теоретичну зміну їх довговічності (рис. 21) для окремих випадків індикації відмов ТС.

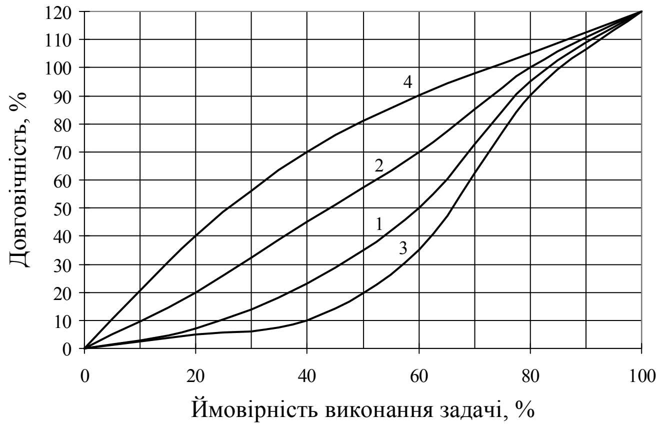


Рисунок 20. Залежність довговічності дизелів ССРС залізниць від ймовірності виконання задач при ТО-2 (1,2) та КР (3, 4) у випадку: 1, 3 – миттєвої індикації відмов; 2, 4 – відсутності самостійного прояву відмов

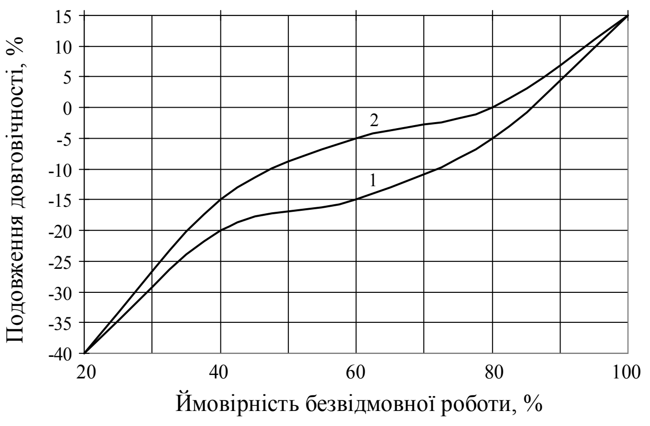


Рисунок 21. Подовження довговічності дизелів ССРС залізниць при забезпеченні відповідного рівня їх ймовірності безвідмовної роботи під час експлуатації у випадку: 1 – миттєвої індикації відмов; 2 – відсутності самостійного прояву відмов

При забезпеченні високого рівня безвідмовної роботи дизелів ССРС залізниць, тобто при якісному виконанні операцій у системі ТОР та при підтриманні їх технічно справного стану на належному рівні, не допускаючи перевищення номінальних режимів роботи у процесі експлуатації, можна досягти підвищення довговічності до 15 %. Якщо цих умов не дотримуватись, то відбувається зниження довговічності дизелів до 40 %.

Далі, проведено моніторинг технічного стану дизелів, який дав можливість побудувати порівняльну діаграму подовження ресурсу дизелів ССРС залізниць до КР при застосуванні модифікованих ТС та прискорення процесу їх припрацювання. Результати наведено на рис. 22.

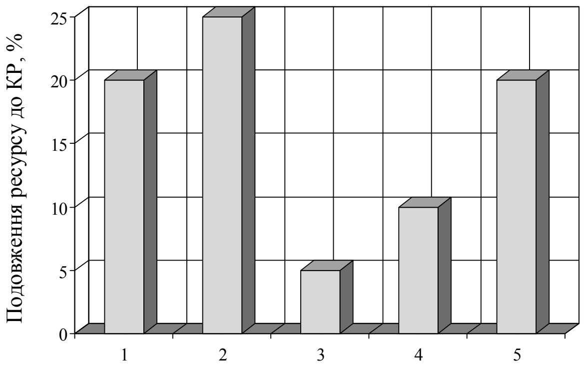


Рисунок 22. Порівняльна діаграма подовження ресурсу дизелів до КР при модифікованих ТС: 1 – вуглекислим газом; 2 – природним графітом з ніобієм; при додаванні природного графіту з ніобієм до: 3 – моторного масла; 4 – камери згоряння при перших двох ТО-2; 5 – камери згоряння через два ТО-2

Відповідно до технічного стану дизелів змінюється питома витрата палива, а отже і величина ефективної потужності. У процесах експлуатації дизелів ССРС залізниць для забезпечення технічно-справного стану та належного рівня їх довговічності постійно здійснюють технічні дії у системі ТОР. Вплив витрат палива на ймовірність безвідмовної роботи дизелів ССРС залізниць, враховуючі експериментальні дослідження, запропоновано подавати у вигляді графічної інтерпретації (рис. 23).

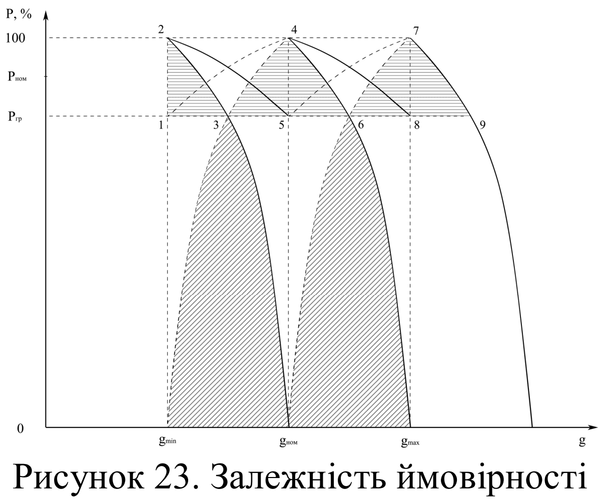


Рисунок 23. Залежність ймовірності безвідмовної роботи дизелів ССРС залізниць від питомої витрати палива

Графічна інтерпретація показує вплив технічних дій у системі ТОР на ймовірність безвідмовної роботи та питомої витрати палива дизелів ССРС залізниць. Крім того, спостерігається чітка залежність P від g. Відповідно до наведеної ілюстрації з урахуванням ефективної потужності, яка властива для відповідного режиму, можна записати вираз для визначення годинної витрати палива дизеля:

$$G_e = P_e \int_0^{P_{max}} \int_0^{g_{max}} P(g_e) dP dg_e, \qquad (13)$$

де P_e – ефективна потужність дизеля, кВт; $P(g_e)$ – функція залежності ймовірності безвідмовної роботи від питомої витрати палива, вибирається відповідно до стану, в якому знаходиться дизель, і згідно графічної інтерпретації; P_{max} – максимальне значення безвідмовної роботи дизеля; g_{max} – максимальна питома витрата палива, приймається згідно зафіксованих значень у процесі експлуатації, г/(кВт·год).

Якщо кожну годину фіксувати витрату палива на дизелях у процесі експлуатації та порівнювати зі значенням її граничної величини, то в цьому випадку можна записати залежність настання часу необхідності проведення технічного обслуговування в наступному вигляді:

$$t_{TO}^{G} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} G_{ei} t_i + \sum_{j}^{m} G_{ej}^{гр} t_j}{\sum_{i=1}^{m} \overline{G}_{ei}}, \quad \begin{matrix} i = 1,2,3...n \\ j = n...m \end{matrix}, \tag{14}$$

де $\sum_{j}^{m} G_{ej}^{гр}$ – сума граничних годинних витрат палива дизеля в інтервалі від j до m, відповідно до умов експлуатації цей інтервал приймається на розсуд власника, але його різниця не може перевищувати 8 (на думку автора);

$\sum_{i=1}^{m} \overline{G}_{ei}$ – сума середньої годинної витрати палива без урахування граничних значень годинних витрат палива;

t_i – i-те напрацювання до граничної величини годинної витрати палива, год;

t_j – j-те напрацювання від початку встановлення граничної величини годинної витрати палива, год.

Відповідно до останнього виразу за відомих мінімальних, максимальних і граничних значень годинної витрати палива можна навести графічну інтерпретацію необхідності настання терміну проведення ТО (рис. 24).

Знаючи кількість номерних ТО для конкретної марки дизеля можна дати оцінку міжремонтному ресурсу в залежності від годинної витрати палива:

$$t_{мр}^{G} = (N_{TO-1} + N_{TO-2}) \frac{\sum_{i=1}^{n-1} G_{ei} t_i + \sum_{j}^{m} G_{ej}^{гр} t_j}{\sum_{i=1}^{m} \overline{G}_{ei}}, \tag{15}$$

а довговічність дизелів у залежності від годинної витрати палива запишемо у наступному вигляді:

$$L^{G} = (N_{KP} + 1)(N_{TO-1} + N_{TO-2}) \frac{\sum_{i=1}^{n-1} G_{ei} t_i + \sum_{j}^{m} G_{ej}^{гр} t_j}{\sum_{i=1}^{m} \overline{G}_{ei}}, \tag{16}$$

де $N_{TO-1}, N_{TO-2}, N_{KP}$ – кількість ТО-1, ТО-2 та КР відповідно.

Графічно представити залежність довговічності дизелів від напрацювання при проведенні технічного обслуговування і ремонту з фіксацією годинної витрати палива можна наступним чином (рис. 25).

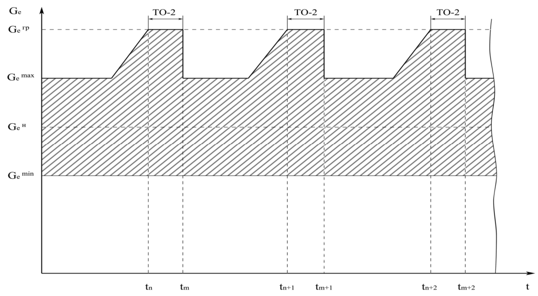


Рисунок 24. Залежність проведення технічного обслуговування дизелів від годинної витрати палива

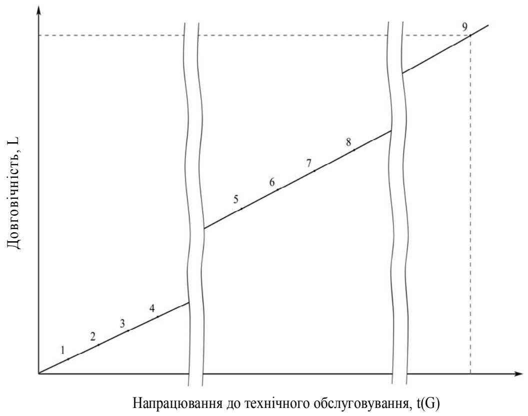


Рисунок 25. Залежність довговічності дизелів ССРС залізниць від напрацювання при проведенні технічного обслуговування і ремонту з фіксацією годинної витрати палива

Далі, вираз (14) записано з урахуванням формули (13) і отримано залежність терміну проведення ТО від питомої витрати палива з урахуванням ймовірності безвідмовної роботи:

$$t_{TO}^{gP} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} t_i P_{ei} \int_{P_{гр}}^{P_{max}} \int_{0}^{g_{max}} P(g_{ei}) dP dg_{ei} + \sum_{j}^{m} t_j P_{ej} \int_{0}^{P_{гр}} \int_{0}^{g_{max}} P(g_{ej}^{гр}) dP dg_{ej}}{\sum_{i=1}^{m} \frac{P_{ei}}{m} \int_{P_{гр}}^{P_{max}} \int_{0}^{g_{max}} P(g_{ei}) dP dg_{ei}}. \quad (17)$$

Графічну інтерпретацію проведення ТО дизелів з урахуванням питомої витрати палива, відповідно до залежності (21), приведено наступним чином (рис. 26). При цьому необхідно визначити максимальні, мінімальні та граничні значення питомої витрати палива.

Знаючи кількість номерних ТО для конкретної марки дизеля можна дати оцінку міжремонтному ресурсу в залежності від питомої витрати палива з урахуванням ймовірності безвідмовної роботи:

$$t_{мр}^{gP} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} t_i P_{ei} \int_{P_{гр}}^{P_{\max}} \int_{0}^{g_{\max}} P(g_{ei}) dP dg_{ei} + \sum_{j}^{m} t_j P_{ej} \int_{0}^{P_{гр}} \int_{0}^{g_{\max}} P(g_{ej}^{гр}) dP dg_{ej}}{\sum_{i=1}^{m} \frac{P_{ei}}{m} \int_{P_{гр}}^{P_{\max}} \int_{0}^{g_{\max}} P(g_{ei}) dP dg_{ei}} (N_{TO-1} + N_{TO-2}). \quad (18)$$

Тоді, довговічність дизелів у залежності від питомої витрати палива з урахуванням ймовірності безвідмовної роботи:

$$L^{gP} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} t_i P_{ei} \int_{P_{гр}}^{P_{\max}} \int_{0}^{g_{\max}} P(g_{ei}) dP dg_{ei} + \sum_{j}^{m} t_j P_{ej} \int_{0}^{P_{гр}} \int_{0}^{g_{\max}} P(g_{ej}^{гр}) dP dg_{ej}}{\sum_{i=1}^{m} \frac{P_{ei}}{m} \int_{P_{гр}}^{P_{\max}} \int_{0}^{g_{\max}} P(g_{ei}) dP dg_{ei}} (N_{KP} + 1)(N_{TO-1} + N_{TO-2}). \quad (19)$$

Останній вираз можна подати у вигляді графічної інтерпретації (рис. 27), яка уточнює можливість підвищення довговічності дизелів ССРС залізниць.

Запропонований спосіб реалізовано на ССРС у колійних господарствах залізниць Знам’янської дирекції перевезень.

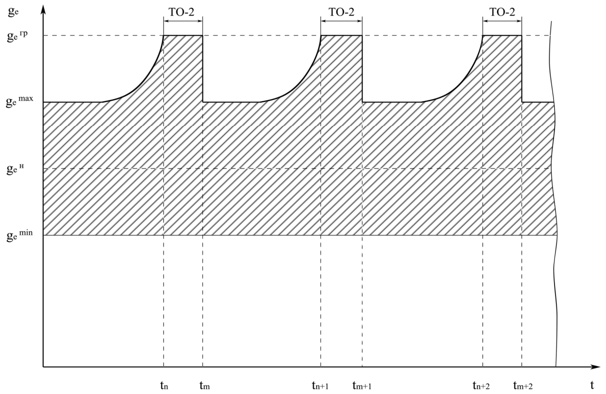


Рисунок 26. Залежність проведення ТО дизелів від питомої витрати палива

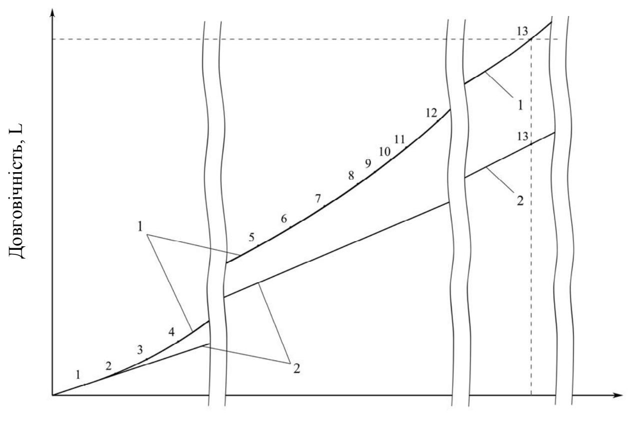


Рисунок 27. Графічна інтерпретація залежності довговічності дизелів ССРС залізниць від напрацювання при виконанні ТОР залежно від питомої витрати палива: 1 – з урахуванням ймовірності безвідмовної роботи; 2 – без урахуванням ймовірності безвідмовної роботи

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У результаті проведених теоретичних та експериментальних досліджень вирішена наукова проблема підвищення довговічності, забезпечення працездатності та ефективності експлуатації дизелів спеціального самохідного рухомого складу залізниць та розроблені наукові основи із застосуванням комплексного підходу, який включає модифікування відповідальних трибосистем, прискорення процесу їх припрацювання, розробки системи технічного обслуговування та ремонту і моніторингу технічного стану дизелів. Головні наукові та прикладні результати досліджень полягають у наступному.

1. Аналіз роботи та методів підвищення довговічності дизелів спеціального самохідного рухомого складу залізниць показав, що для вирішення зазначеної проблеми необхідно застосувати комплексний підхід, який включає технологічні методи, методи прискорення процесів припрацювання та систему технічного обслуговування та ремонту з моніторингом їх технічного стану.

2. Проведений огляд існуючих теоретичних положень щодо визначення та прогнозування довговічності дизелів показав, що значна кількість методів та методик дозволяє визначати ресурс деталей для конкретних умов їх експлуатації, проводити прогнозування, виходячи з експериментальних даних, які отримані в процесі попередніх досліджень. Тобто, системні дані, що включають різні фактори враховуються на 40…60 % і не дають можливості проводити прогнозування залишкового ресурсу окремих трибосистем чи дизелів у цілому.

3. Для оцінки впливу різних методів підвищення довговічності дизелів з урахуванням експлуатаційних факторів вперше отримано залежність інтенсивності зносу ТС дизелів ССРС залізниць, яка є єдиним критерієм можливості протікання процесів самоорганізації, тобто утворення дисипативних структур. На основі цього виразу встановлено, що для протікання таких процесів у ТС найефективнішим методом є лазерне модифікування.

4. На основі синергетичного підходу та кінетичної концепції руйнування матеріалів ТС дизелів ССРС залізниць вперше отримана модель для прогнозування довговічності дизелів, яка враховує показники безвідмовності, систему ТОР і умови роботи ССРС залізниць, застосування різних технологічних методів підвищення довговічності та процеси припрацювання в ТС. Модель включає вираз для прогнозування залишкового ресурсу дизелів при наявності даних про їх технічний стан, проходження процесів самоорганізації в ТС у залежності від розподілення часу їх роботи

5. Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено застосування дискретного лазерного модифікування робочих поверхонь ТС дизелів з основним елементом для модифікування вуглецем, у вигляді вуглекислого газу та природного графіту з модифікатором – ніобієм, що вводяться у зону лазерного випромінювання. Не дивлячись на високу вартість застосування лазерного модифікування, експлуатаційні дослідження доводять доцільність його застосування, оскільки ресурс дизелів у середньому збільшується на 28…37 %, а техніко-експлуатаційні параметри поліпшуються до 25%.

6. Теоретичні передумови прискорення процесів припрацювання ТС дизелів ССРС залізниць надали можливість отримати вираз для визначення інтенсивності їх зносу у процесі припрацювання, який отримано на основі теорій тертя та зношування з використанням основних положень теорії дислокаційно-вакансійного механізму. Крім того, для прискорення процесів припрацювання запропоновано додавати природний графіт з ніобієм до моторного масла та вводити його до камери згоряння на такті впуску, що в експлуатації призводить до подовження ресурсу дизелів на 12…20 % та покращення техніко-експлуатаційних характеристик до 20 %.

7. На основі регенеруючих, марківських та напівмарківських процесів одержала подальший розвиток математична модель для опису оптимальних термінів проведення ТОР дизелів, яка включає залежності ймовірності безвідмовної роботи, коефіцієнту готовності та ймовірності виконання задач від часової функції для наступного вибору стратегії ТОР та вказує на необхідність врахування повноти інформації, що належить до категорії відмов відповідальних ТС.

8. Для визначення оптимальних термінів проведення ТОР, міжремонтного ресурсу та довговічності дизелів ССРС залізниць у залежності від експлуатаційних параметрів вперше отримані математичні моделі, які включають годинну і питому витрати палива та ймовірність безвідмовної роботи, фіксуючи які в процесі експлуатації та порівнюючи із значенням їх граничної величини визначаються терміни проведення ТО, а знаючи кількість номерних ТО та КР – надаються оцінки міжремонтного ресурсу та довговічності дизелів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ

Основні наукові праці

1. Мямлін С.В. Барановський Д.М.: Працездатність, ефективність експлуатації та довговічність дизелів спеціального самохідного рухомого складу залізниць: Монографія [Текст] / С.В. Мямлін, Д.М. Барановський – Дн-вськ: Вид-во Маковецький, 2011. – 267 с. – ISBN 978-966-1507-62-2.

2. Барановський Д.М. Аналіз технологічних методів підвищення довговічності дизелів // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2008. – №4/9(34). – С. 41-43.

3. Барановський Д.М. Самоорганізація структур в процесі дисипації // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2009. – №3/8(39). – С. 28-30.

4. Барановський Д.М. Визначення технічного стану дизелів засобів транспорту методом крапельної проби моторної оливи / Д.М. Барановський, О.Ю. Жулай // Автомобильный транспорт. Сборник научных трудов. – 2009. - Вип. 24. – С. 113-115.

5. Барановський Д.М. Проблема довговічності дизелів засобів транспорту / Д.М. Барановський, О.Ю. Жулай // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – 2009. – Вип. 5/2009 (58) ч. 1. – С. 96-99.

6. Барановський Д.М. Результати випробування системи діагностичного моніторингу дизелів / Д.М. Барановський, О.Ю. Жулай // Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського. – Вип. 6(59). – 2009. – С. 105-109.

7. Барановський Д.М. Загальний підхід до оцінки та прогнозування ресурсу дизелів засобів транспорту // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2009. – №4/10(40). – С. 49-52.

8. Барановський Д.М. Визначення залишкового ресурсу трибосистем // Проблеми трибології. – 2009. – №4. – С. 127-129.

9. Барановський Д.М. Підвищення ресурсу дизелів при прискоренні процесу припрацювання // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2009. – №6/1(42). – С. 47-50.

10. Мямлін С.В. Підвищення довговічності дизелів спеціального самохідного рухомого складу залізниць шляхом модифікування їх трибосистем / С.В. Мямлін, Д.М. Барановський // Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту. – 2010. – № 119. – С. 93-99.

11. Мямлін С.В. Технічний стан дизелів спеціального самохідного рухомого складу залізниць при модифікуванні трибосистем / С.В. Мямлін, Д.М. Барановський // Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту. Серія «Транспортні системи і технології». Вип. 17. – 2010. – С. 98-103.

12. Мямлін С.В. Вплив модифікування трибосистем дизелів спеціального самохідного рухомого складу на їх інтенсивність зносу / С.В. Мямлін, Д.М. Барановський // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. ак. В. Лазаряна. – 2010. – № 36. – С. 28-32.

13. Мямлін С.В. Визначення інтенсивності зношування трибосистем дизелів спеціального самохідного рухомого складу залізниць при лазерному модифікуванні / С.В. Мямлін, Д.М. Барановський // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2010. –№ 6 (148). – С. 26-32.

14. Мямлін С.В. Дослідження довговічності дизелів спеціального самохідного рухомого складу в умовах експлуатації залізниць / С.В. Мямлін, Д.М. Барановський // Збірник наукових праць Донецького інституту залізничного транспорту. – № 24. – 2010. – С. 81-87.

15. Мямлін С.В. Обґрунтування підвищення довговічності дизелів спеціального самохідного рухомого складу залізниць при прискоренні процесу припрацювання / С.В. Мямлін, Д.М. Барановський // Збірник наукових праць Донецького інституту залізничного транспорту. – № 23. – 2010. – С. 67-75.

16. Барановський Д.М. Визначення технічного стану дизелів засобів транспорту АПК за хімічним аналізом моторної оливи / Д.М. Барановський, О.Ю. Жулай // Проблеми трибології. – 2010. – №1. – С. 26-28.

17. Барановський Д.М. Систематизація методів отримання інформації про технічний стан дизелів / Д.М. Барановський, О.Ю. Жулай // Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського. – Вип. 1(60). – 2010. – С. 122-126.

18. Барановський Д.М. Аналіз систем моніторингу технічного стану дизелів / Д.М. Барановський, О.Ю. Жулай // Вісник КПІ. – Вип. 52. – 2010. С. 140-144.

19. Барановський Д.М. Підвищення довговічності дизелів із застосуванням оптимальної мікрогеометрії трибосисеми «гільза-кільце» // Автомобильный транспорт. Сборник научных трудов. – 2010. – Вип. 26. – С. 81-85.

20. Барановський Д.М. Математичне обґрунтування оптимальних термінів проведення технічного обслуговування та ремонтів дизелів // Вісник ХНУ. – 2010. – № 1. – С. 54-60.

21. Барановський Д.М. Теоретичне обґрунтування зниження інтенсивності зношування трибосистем дизелів // Вісник Донецької академії автомобільного транспорту. – 2010. – № 1. – С. 62-66.

22. Барановський Д.М. Підвищення довговічності дизелів шляхом модифікування поверхонь вирішальних трибосистем // Вісник НУВГП. – 2010. – № 2. – С. 89-96.

23. Барановський Д.М. Підвищення довговічності дизелів вчасним проведенням технічного обслуговування та ремонту // Вісті автомобільно-дорожнього інституту. – 2010. – № 1. – С. 125-129.

24. Барановський Д.М. Експериментальні дослідження триботехнічних властивостей трибосистем дизелів у процесі їх модифікування // Вісник Донецької академії автомобільного транспорту. – 2010. – № 2. – С. 48-54.

25. Барановський Д.М. Довговічність, технічне обслуговування і ремонт дизелів у залежності від експлуатаційних параметрів // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – 2010. – № 3(20). – С. 24-27.

26. Барановський Д.М. Експериментальні дослідження взаємозв’язку технічного стану дизелів і термінів проведення технічного обслуговування /

Д.М. Барановський, В.В. Драгобецький // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. – 2010. – № 42. – С. 93-97.

27. Барановський Д.М. Теоретична оцінка залежності діагностичних параметрів і надійності дизелів / Д.М. Барановський, О.Ю. Жулай // Всеукраїнський науково-технічний журнал «Двигуни внутрішнього згоряння». – НТУ «ХПІ». – № 2. – 2010. – С. 137-140.

28. Барановський Д.М. Прогнозування довговічності дизелів // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – № 2/10(40). – С. 49-52.

29. Барановський Д.М. Прогнозування довговічності, технічного обслуговування та ремонту дизелів за експлуатаційними характеристиками // Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського. – Вип. 2(61). – 2010. – С. 37-41.

30. Барановський Д.М. Вплив модифікаторів на технічні параметри дизелів // Міжвузівський збірник «Наукові нотатки». – Луцьк. – Вип. 28. – 2010. – С. 52-56.

31. Барановський Д.М. Технічні параметри дизелів при експлуатаційній модифікації гільз циліндрів // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2010. –№1(143). – С. 21-26.

32. Барановський Д.М. Довговічність та техніко-експлуатаційні параметри дизелів спеціального самохідного рухомого складу залізниць при модифікуванні трибосистем / Д.М. Барановський, С.В. Мямлін // Вісті автомобільно-дорожнього інституту. – 2010. – № 2. – С. 5-9.

33. Барановський Д.М. Моделювання процесів модифікування гільз циліндрів дизелів спеціального самохідного рухомого складу залізниць / Д.М. Барановський, С.В. Мямлін, В.В. Драгобецький // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. – 2010. – № 45. – С. 46-51.

34. Мямлін С.В. Технічні характеристики дизелів спеціального самохідного рухомого складу залізниць при використанні модифікованих трибосистем / С.В. Мямлін, Д.М. Барановський // Научный вестник Донбасской государственной машиностроительной академии. – 2011. – № 1(6Е). – С. 166-171.

35. Мямлін С.В. Визначення інтенсивності зношування трибосистем дизелів спеціального самохідного рухомого складу залізниць в процесі їх припрацювання / С.В. Мямлін, Д.М. Барановський // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – Вип. 1(66). – 2011. – С. 58-61.

36. Мямлін С.В. Енергоресурсні характеристики дизелів спеціального самохідного рухомого складу залізниць при експлуатаційній модифікації гільз циліндрів / С.В. Мямлін, Д.М. Барановський // Вісник двигунобудування. – Вип. 2. – 2011. – С. 48-53.

37. Мямлін С.В. Теоретичне обґрунтування підвищення довговічності дизелів спеціального самохідного рухомого складу залізниць при протіканні процесів самоорганізації / С.В. Мямлін, Д.М. Барановський // Науково-практичний журнал «Залізничний транспорт». – 2011. – № 1(86). – С. 52-55.

38. Мямлін С.В., Барановський Д.М. Дослідження характеру і величини зносу трибосистем дизелів спеціального самохідного рухомого складу залізниць // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. ак. В. Лазаряна. – 2011. – № 37. – С. 38-43.

39. Мямлін С.В. Дослідження технічних характеристик дизелів спеціального самохідного рухомого складу залізниць при додаванні природного графіту з ніобієм до моторного масла / С.В. Мямлін, Д.М. Барановський // Науково-практичний журнал «Залізничний транспорт». – 2011. – № 3(88). – С. 31-34.

40. Мямлін С.В. Визначення основних показників надійності та порівняльна оцінка довговічності дизелів спеціального самохідного рухомого складу залізниць / С.В. Мямлін, Д.М. Барановський // Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту. – 2011. – № 120. – С. 9-15.

Праці апробаційного характеру

41. Барановський Д.М. Синергетичний підхід до визначення ресурсу дизелів // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні технології в управлінні та професійній підготовці операторів складних систем». Кіровоград. – ДЛАУ. – 2008. – С. 213.

42. Барановський Д.М. Лазерне модифікування трибосистем дизелів // Сучасні технології в промисловому виробництві: матеріали Всеукраїнської міжвузівської наук.-техн. конференції: у трьох частинах. – Суми: Вид-во СумДУ, 2010. – Ч. II. – С. 165.

43. Барановський Д.М. Rise of longevity of diesels by the timely conducting of technical service and repair // Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта: Тезисы 70 Международной научно-практической конференции. – Д.: ДИИТ, 2010. – С. 38.

44. Барановський Д.М. Підвищення триботехнічних властивостей трибосистем дизелів при лазерному модифікуванні // Прогресивна техніка і технологія – 2010: Тези доповідей Міжнародної науково-технічної конференції присвяченої 100-річчю від дня народження академіка НАН України Г.С. Писаренка. – К.: НТУУ «КПІ», 2010. – С. 117.

45. Барановський Д.М. Complex scientific and technical approach to solving of diesel operating life increase problem // Матеріали першої міжнародної словацько-української конференції. - Банська Бистрика (Словаччина), 2010. – С. 2-4.

46. Барановський Д.М. Комплексний науково-технічний підхід до вирішення проблеми підвищення довговічності дизелів спеціального самохідного рухомого складу залізниць // Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми і перспективи розвитку транспортних систем: техніка, технологія, економіка і управління» К.: ДЕТУТ, 2011. – С. 24.

47. Барановський Д.М. Працездатність та довговічність дизелів спеціального самохідного рухомого складу залізниць // Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта: Тезисы 71 Международной научно-практической конференции. – Д.: ДИИТ, 2011. – С. 78.

48. Барановський Д.М. Підвищення працездатності та довговічності дизелів спеціального самохідного рухомого складу залізниць при лазерному модифікуванні їх трибосистем // Прогресивна техніка та технологія – 2011: Тези доповідей XII Міжнародної науково-технічної конференції. – К.: НТУУ «КПІ», 2011. – С. 122.

49. Барановський Д.М. Підвищення фізико-механічних та триботехнічних властивостей трибосистем дизелів при лазерному модифікуванні // Матеріали 10-го міжнародного симпозіуму українських інженерів-механіків у Львові. – Л.: НТУ «Львівська політехніка», 2011. – С. 48.

Додаткові наукові праці

50. Пат. 26969. Спосіб модифікування поверхонь лазерною обробкою. Аулін В.В., Барановський Д.М., Барановська М.Ю. Патент на корисну модель № 26969. Заявлено 11.06.07. Заявка № u 2007 06507; Опубл. 10.10.07, Бюл. №16.

51. Пат. 52075. Спосіб припрацювання деталей циліндро-поршневої групи дизелів. Барановський Д.М. Пат. 52075 Україна, МПК(2009) F02B 9/00 №u201002074; Заявл. 25.02.2010; Опубл. 10.08.2010; Бюл. № 15, 2010 р.

52. Пат. 56249. Спосіб підвищення ресурсу колінчастих валів дизелів. Барановський Д.М. Пат. 56249 Україна, МПК(2011.01) F02B 9/00 №u201006805, Заявл. 02.06.2010, Опубл. 10.01.2011, Бюл. № 1, 2011 р.

53. Пат. 60610. Спосіб зменшення зносу деталей дизелів при ковзанні. Мямлін С.В., Барановський Д.М. Пат. 60610 Україна, МПК(2011.01) F16J 10/00 №u2010 13974, Заявл. 23.11.2010, Опубл. 25.06.2011, Бюл. № 12, 2011 р.

54. Пат. 60012. Спосіб підвищення ресурсу колінчастого валу дизеля. Мямлін С.В., Барановський Д.М. Пат. 60012 Україна, МПК(2006.01) C21D 1/09 №u2010 13252, Заявл. 08.11.2010, Опубл. 10.06.2011, Бюл. № 11, 2011 р.

55. Пат. 60609. Спосіб підвищення довговічності гільз циліндрів дизелів. Мямлін С.В., Барановський Д.М. Пат. 60609 Україна, МПК(2011.01) F16J 10/00 №u2010 13968, Заявл. 23.11.2010, Опубл. 25.06.2011, Бюл. № 12, 2011 р.

АНОТАЦІЯ

Барановський Д.М. Розвиток наукових основ підвищення довговічності дизелів спеціального самохідного рухомого складу залізниць. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.20 – Експлуатація та ремонт засобів транспорту. – Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпропетровськ, 2012.

Дисертація присвячена питанням розробки наукових основ підвищення довговічності дизелів ССРС залізниць. У дисертації наведено результати досліджень працездатності, ефективності експлуатації та довговічності дизелів ССРС залізниць. Математичне моделювання довговічності дизелів проведено на основі синергетичного принципу з використанням термодинамічного аспекту. Отримано модель для прогнозування довговічності дизелів на основі синергетичного підходу та кінетичної концепції руйнування матеріалів ТС, яка враховує показники безвідмовності, систему ТОР і умови роботи ССРС залізниць, застосування різних технологічних методів підвищення довговічності та процеси припрацювання в ТС. Модель включає вираз для прогнозування залишкового ресурсу дизелів при наявності даних про їх технічний стан, проходження процесів самоорганізації в ТС та від розподілення часу їх роботи; а також залежність інтенсивності зносу ТС дизелів з урахуванням експлуатаційних факторів при використанні різних методів підвищення їх довговічності, яка дозволяє обрати раціональний технологічний метод для відповідних умов експлуатації ССРС залізниць при забезпеченні найнижчого значення інтенсивності зносу ТС.

Для підвищення працездатності та довговічності дизелів, теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено застосування лазерного модифікування поверхонь відповідальних ТС із подачею у зону опромінення вуглекислого газу чи природного графіту з ніобієм. При цьому, показники працездатності та довговічності дизелів збільшились до 37 %.

Запропоноване прискорення процесів припрацювання у дизелях ССРС дозволяє забезпечити їх високий рівень працездатності та ефективності експлуатації. При додаванні природного графіту з ніобієм до моторного масла, ресурс дизелів до капітального ремонту підвищується до 14 %, а при експлуатаційній модифікації – до 20 %.

При проведенні запропонованих заходів показано, що система ТОР дизелів змінює свою структуру. Крім того, для дизелів запропоновано новий підхід до визначення термінів проведення технічного обслуговування та ремонту в залежності від їх експлуатаційних параметрів та отримано математичні моделі термінів проведення ТОР, міжремонтного ресурсу та довговічності дизелів ССРС залізниць у залежності від експлуатаційних параметрів: годинної, питомої витрати палива і ефективної потужності з урахуванням ймовірності безвідмовної роботи, фіксуючи які в процесі експлуатації та порівнюючи із значенням їх граничної величини можна визначити терміни проведення ТО, а знаючи кількість номерних ТО та КР – надати оцінку міжремонтному ресурсу та довговічності дизелів.

Ключові слова: довговічність, дизелі, ресурс, інтенсивність зносу, лазерне модифікування, прискорення процесів припрацювання, надійність, система

технічного обслуговування та ремонту.

АННОТАЦИЯ

Барановский Д.Н. Развитие научных основ повышения долговечности дизелей специального самоходного подвижного состава железных дорог. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени доктора технических наук по специальности 05.22.20 – Эксплуатация и ремонт средств транспорта. – Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, Днепропетровск, 2012.

Диссертация посвящена вопросам разработки научных основ повышения долговечности дизелей специального самоходного подвижного состава (ССПС) железных дорог. В диссертации приведены результаты исследований работоспособности, эффективности эксплуатации и долговечности дизелей ССПС железных дорог. Математическое моделирование долговечности дизелей проведено на основе синергетического принципа с использованием термодинамического аспекта. Получена модель для прогнозирования долговечности дизелей на основе синергетичного подхода и кинетической концепции разрушения материалов ТС, которая учитывает показатели безотказности, систему технического обслуживания и ремонта (ТОР) и условия работы ССПС железных дорог, применения разных технологических методов повышения долговечности и процессы приработки в трибосистемах (ТС). Модель включает выражение для прогнозирования остаточного ресурса дизелей при наличии данных об их техническом состоянии, прохождении процессов самоорганизации в ТС и от распределения времени их работы; а также зависимости интенсивности износа ТС дизелей с учетом эксплуатационных факторов при использовании разных методов повышения их долговечности, которая позволяет избрать рациональный технологический метод для соответствующих условий эксплуатации ССПС железных дорог при обеспечении самого низкого значения интенсивности износа ТС.

На основе термодинамического аспекта с учетом второй вариации энтропии (избыточное производство энтропии) получено уравнение, которое является критерием возможности протекания процессов самоорганизации подсистем второго уровня, то есть ответственных ТС дизелей, с учетом конструктивных особенностей цилиндропоршневой группы и кривошипно-шатунного механизма. Внешним проявлением самоорганизации в таких ТС есть стабилизация интенсивности изнашивания, которая устанавливается в последнюю очередь после полной стабилизации всех силовых, тепловых и микрогеометрических параметров. Последнее возможно, если структура материала сопряжённых поверхностей ТС находится в неравновесном состоянии.

Предложен метод прогнозирования остаточного ресурса дизелей по диагностическим параметрам, который включает мониторинг их технического состояния и позволяет с высокой вероятностью определить предельный, остаточный и использованный ресурс, наиболее обосновано принимать конкретные технические решения по восстановлению технического состояния дизелей в конкретные моменты эксплуатации, то есть определять оптимальные сроки и объём работ технического обслуживания (ТО), текущего ремонта (ТР), среднего ремонта (СР) и

капитального ремонта (КР) дизелей ССПС железных дорог.

Для разных эксплуатационных режимов работы ССПС, применяя гармоничную функцию для описания информационной энтропии, было получено выражение для определения интенсивности износа ТС дизелей, которое позволяет определять их возможное техническое состояние в течение всего жизненного цикла, а также моделировать процессы эксплуатации.

Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено применение дискретной лазерной модификации рабочих поверхностей ТС дизелей с основным элементом для модификации углеродом, в виде углекислого газа и природного графита с модификатором – ниобием, что вводятся в зону лазерного излучения. Несмотря на высокую стоимость применения лазерной модификации, эксплуатационные исследования подтверждают целесообразность его применения, поскольку ресурс дизелей в среднем увеличивается на 28…37 %, а технико-эксплуатационные параметры улучшаются до 25%.

Теоретические предпосылки ускорения процессов приработки ТС дизелей ССПС железных дорог предоставили возможность получить выражение для определения интенсивности их износа в процессе приработки, которое получено на основе теорий трения и изнашивания с использованием основных положений теории дислокационно-вакансионного механизма. Кроме того, для ускорения процессов приработки предложено добавлять природный графит с ниобием к моторному маслу и вводить его в камеру сгорания на такте впуска, что в эксплуатации приводит к повышению ресурса дизелей на 12...20 % и к улучшению технико-эксплуатационных характеристик до 20 %.

При проведении предложенных мероприятий показано, что система технического обслуживания и ремонта дизелей изменяет свою структуру.

Последующее развитие приобрела математическая модель для описания оптимальных сроков проведения ТОР дизелей на основе регенерирующих, марковских и полумарковских процессов, которая включает зависимости вероятности безотказной работы, коэффициента готовности и вероятности выполнения задач в зависимости от часовой функции для последующего выбора стратегии ТОР и указывает на необходимость учета полноты информации, которая принадлежит к категории отказов ответственных ТС.

Кроме того, для дизелей предложен новый подход к определению сроков проведения технического обслуживания и ремонта в зависимости от их эксплуатационных параметров. При этом, получены математические модели сроков проведения ТОР, межремонтного ресурса и долговечности дизелей ССПС железных дорог в зависимости от эксплуатационных параметров: часового, удельного расхода топлива и эффективной мощности с учетом вероятности безотказной работы, фиксируя которые в процессе эксплуатации и сравнивая со значением их предельной величины можно определить сроки проведения ТО, а зная количество номерных ТО и КР – получить оценку межремонтному ресурсу и долговечности дизелей.

Ключевые слова: долговечность, дизели, ресурс, интенсивность износа, лазерная модификация, ускорение процессов приработки, надежность, система технического обслуживания и ремонта.

SUMMARY

Baranovskiy D.N. Development of scientific bases of increase of longevity of diesels of the special self-propelled mobile composition of railways. – Manuscript.

The dissertation on competition for a scientific degree of the doctor of engineering science in a speciality 05.22.20 – Exploitation and repair of facilities of transport. – Dnipropetrovs'k National University of railway transport named after academician V. Lazaryan. – Dnepropetrovsk, 2012.

Dissertation is devoted to the questions of development of scientific bases of rise of longevity of diesels of the special self-propelled mobile composition (SSMC) of railways. In dissertation the results of researches of capacity, efficiency of exploitation and longevity of diesels of the SSMC railways are resulted. The mathematical design of longevity of diesels is conducted on the basis of synergetic principle with the use of thermodynamics aspect. A model for prognostication of longevity of diesels on the basis of synergetic approach and kinetic conception of destruction of the TS materials, which takes into account the indexes of faultless, system of TSR and terms of work of the SSMC railways, applications of different technological methods of rise of longevity and processes of earning extra money in TS, is got. A model includes expression for prognostication of remaining resource of diesels at presence of data about their technical state, passing of processes of independent organization in TS and from distributing of time of their work; and also dependences of intensity of wear of the TS diesels taking into account operating factors at the use of different methods of rise of their longevity which allows to choose a rational technological method for the proper external environments of the SSMC railways at providing of the lowest value of intensity of the TS wear.

For the rise of capacity and longevity of diesels, in a theory it is grounded and application of laser modification of surfaces of responsible TS is experimentally confirmed with the serve in the area of irradiation of carbon dioxide or natural graphite with niobium. Thus, the indexes of capacity and longevity of diesels were multiplied to 37 %.

The offered acceleration of processes of burn-in in the diesels of the SSMC allows to provide their high level of capacity and efficiency of exploitation. At addition of natural graphite with niobium to the motor oil, the resource of diesels to major repairs rises to 14 %, and at operating modification – to 20 %.

It is shown during conducting of the offered measures, that the system of technical service and repair of diesels changes the structure. In addition, for diesels new approach to determination of terms of conducting of technical service and repair depending on their operating parameters is offered. The mathematical models of terms of conducting of TSR, between repair resource and longevity of diesels of the SSPS railways depending on operating parameters are got: sentinel, specific expenditure of fuel and effective power taking into account probability of faultless work, fixing which in the process of exploitation and comparing to the value of their maximum size it is possible to define the terms of conducting, and knowing the quantity of containing a number TS and KR – to get estimation to the between repair resource and longevity of diesels.

Keywords: longevity, diesels, resource, intensity of wear, laser modification, acceleration of processes of burn-in, reliability, system of technical service and repair.