

Сагін С.В., Сагін А.С., Заблоцький Ю.В., Фомін О.В.

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ПІДШИПНИКІВ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ

Метою дослідження було визначення впливу антифрикційних покриттів на технічний стан підшипників суднових дизелів. Як антифрикційні покриття використовувалися різні епілами, тонкий шар яких наносився на поверхні вкладишів підшипників суднових дизелів 12V32/40 MAN-Diesel&Turbo. Товщина шару епіламу, що адсорбується на металевій поверхні, контролювалася методом елісометрії. Було встановлено, що товщина шару епіламу на поверхні вкладишів підшипників суднових дизелів може досягати 11,2...17,4 нм. При цьому час, необхідний для його адсорбції, не перевищує 10 хв. Показано, що наночастиці епіламу, нанесений на металеву поверхню, призводить до підвищення структурних характеристик граничного шару моторного мастила, що використовується в системі мащення дизелів, а саме при цьому збільшується товщина граничного шару (від 12,3 мкм до 15,2...18,3 мкм), та крайові кути змочування мастила (від 10,2° до 15,8...17,4°). Експериментально підтверджено, що епіламування поверхонь вкладишів підшипників дозволяє значною мірою знизити їх зношування. Для суднового дизеля 12V32/40 MAN-Diesel&Turbo експериментально встановлено, що епіламування забезпечує 1,1...1,4 кратне зниження зносу поверхні вкладишів підшипників, а також їх кращий технічний стан.

Ключові слова: антифрикційні покриття, вкладиш підшипника, граничний шар, знос, моторне мастило, система мащення, судновий дизель, підшипник ковзання, технічний стан, епіламування

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Технічний стан окремих вузлів або деталей двигунів внутрішнього згоряння (дизелів) відіграє визначальну роль у забезпеченні їхньої надійності та безаварійної роботи. Одними з таких деталей (щодо суднових дизелів) є вкладиші підшипників ковзання, які сприймають нормальні та радіальні навантаження у кривошипно-шатунному механізмі. Тривала та стійка робота підшипників ковзання суднових дизелів неможлива без використання мастильного матеріалу, який є складовою тріади тертя метал (вкладиш підшипника) – мастильний матеріал (мастило) – метал (вал дизеля). При цьому забезпечується гідродинамічний або граничний режим мащення. Короткочасна відсутність мастильного матеріалу в цій тріаді або порушення режиму мащення призводить до стрибкоподібного збільшення зносу вкладишів підшипників і може стати причиною аварії дизеля [1-4].

Крім того, погіршення технічного стану вкладишів підшипників суднових дизелів (пов'язане зі збільшенням зносу їхніх поверхонь) є причиною збільшення зазорів між валом і вкладишем. Це призводить до зростання динамічних навантажень, виникнення биття вала та підвищення зносу вкладишів підшипників. Металеві часточки (які є продуктами зносу вкладишів підшипників) розповсюджуються системою мащення дизеля, збільшуючи механічний вплив на деталі дизеля, насамперед на інші вкладиші, а також втулку циліндра та поршневі кільця [5-7].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Підтримання технічного стану вкладишів підшипників суднових дизелів (як і деяких контактних поверхонь інших машин і механізмів) можливе шляхом спеціальної механічної або фізичної обробки поверхонь, додавання поверхнево активних речовин у мастильний матеріал, а також нанесенням на поверхні спеціальних антифрикційних покриттів [8-10]. У разі спеціальної механічної або фізичної обробки поверхонь змінюється їхня геометрія, при цьому в трибологічній системі метал – мастильний матеріал – метал виникають додаткові пружнодемпфуючі сили, які забезпечують

розклинювальний тиск між поверхнями [11-13]. Поверхнево активні речовини, які додаються в мастильний матеріал, сприяють підвищенню структурної однорідності та збільшенню товщини граничного шару мастила [14-16]. Спеціальні антифрикційні покриття, які наносяться на поверхні тертя, запобігають розтіканню мастильного матеріалу із зони контакту, при цьому забезпечується режим гідродинамічного тертя [17-19].

Формулювання цілей статті. З урахуванням викладеного, метою дослідження було визначення впливу антифрикційних покриттів на технічний стан підшипників суднових дизелів.

Виклад основного матеріалу. Одним із поширених типів антифрикційних покриттів є епілами – полімерні речовини, що містять з'єднання фтору, які наносяться на металеві поверхні. Під час епіламування на поверхні твердого тіла утворюється плівка товщиною до 30 нм, яка не впливає на дислокаційну структуру та твердість металу. Її поверхнева енергія залежить від виду епіламу та не залежить від металу, на який вона наноситься.

Основна функція епіламованого шару полягає в утриманні мастильного матеріалу в зоні тертя енергетичним бар'єром на межі «метал – епілам». Це досягається за рахунок збільшення крайових кутів змочування мастила θ , яке знаходиться у поверхні металу, покритого шаром епіламу (рис. 1), а також за рахунок переспрямування вектору дії сили поверхневого натягу мастила.

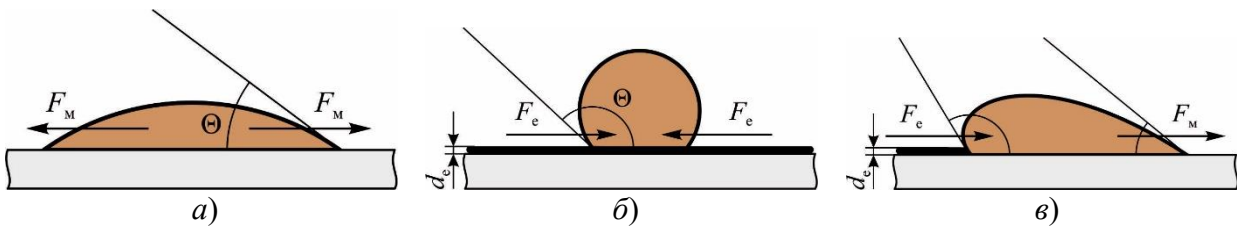


Рисунок 1 – Крайовий кут змочування та напрямок вектора сили поверхневого натягу рідини:

a – мастило на поверхні металу; *b* – мастило на поверхні епіламу; *в* – мастило на межі метал – епілам;

θ – крайовий кут змочування; F_m , F_e – сили поверхневого натягу на металевій поверхні та поверхні, що покрита шаром епіламу, відповідно.

Епіламування сприяє утворенню граничних змащувальних шарів підвищеної (порівняно з поверхнею без нанесеного шару епіламу) товщини. Схема утворення граничних шарів під час нанесення епіламів на металеву поверхню показана на рис. 2.

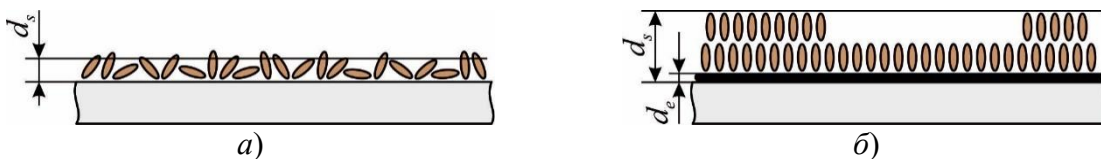


Рисунок 2 – Зміна товщини граничного шару мастила d_s :

a – без нанесення на поверхню шару епіламу; *b* – з нанесенням шару епіламу

Дослідження з визначення впливу органічних покриттів (епіламів) на технічний стан вкладишів підшипників суднових дизелів виконувалися в такій послідовності:

- розробка технології нанесення епіламу на поверхні вкладишів підшипників;
- визначення товщини нанослою епіламу, адсорбованого на металевій поверхні вкладишів підшипників;
- вивчення впливу нанослою епіламу на утворення граничного шару оливи;
- визначення зміни технічного стану вкладишів підшипників у разі нанесення на їхню поверхню нанослою епіламу.

Під час проведення експериментів використовувалися такі епілами: Aqualin, Efren-K та Polisam-20, що мають максимальну температуру експлуатації 450°C та допускають короточасну експлуатацію до температури 700°C. (Надалі у тексті статті епілами довільно позначені як 1, 2, 3.)

Технологія нанесення епіламу на поверхню вкладишів підшипників складалася з наступного. Експерименти виконувалися для нового комплексу вкладишів. Спочатку проводилося їхнє знежирення в ознобезпечному хладоні-116 (C_2F_6) шляхом об'ємного занурення з подальшим висушуванням. Після цього за температурою навколишнього середовища проводилося безпосереднє епіламування шляхом занурення вкладишів у епікам [20-22].

Для визначення товщини шару епіламу, який адсорбувався на поверхні вкладиша підшипника, і товщини граничного змащувального шару мастила, що утворюється на поверхні епіламу, проводилися попередні лабораторні дослідження. Як аналог поверхні вкладиша підшипника використовувалася відполірована металева поверхня, яка шляхом об'ємного занурення покривалася шаром епіламу. Час перебування металевої поверхні в об'ємі епіламу варіювався в діапазоні 2...10 хв, після чого поверхня висушувалася за температурою 20°C. Товщина шару епіламу, який адсорбувався на металевій поверхні, визначалася на еліпсометричній установці, принципова схема якої показана на рис. 3.

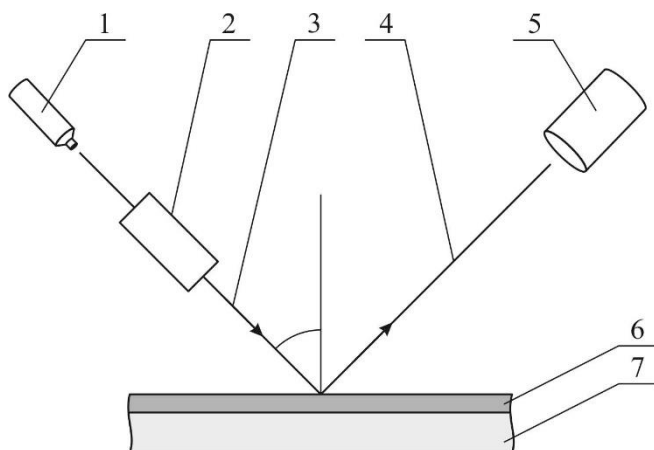


Рисунок 3 – Принципова схема еліпсометричної установки:

1 – джерело світла, 2 – поляризатор; 3 – лінійно поляризоване світло; 4 – еліптично поляризоване світло; 5 – аналізатор; 6 – шар епіламу; 7 – металева поверхня

Еліпсометрія є одним із найпоширеніших методів визначення товщини тонких шарів рідин (прозорих для оптичного вивчення) шляхом аналізу кутів відбиття світла від чистої поверхні та від поверхні з нанесеним покриттям.

Зміна технічного стану вкладишів підшипників у разі нанесення на їхні поверхні шару антифрикційного покриття (епіламу) виконувалася для суднового дизеля 12V32/40 MAN-Diesel&Turbo. Ці дизелі є одними з найпоширеніших моделей фірми MAN-Diesel&Turbo і використовуються як на морському [23-25], так і на залізничному транспорті [26, 27], а також у стаціонарних енергетичних установках (як генератори електростанцій). Два дизелі 12V32/40 MAN-Diesel&Turbo були встановлені на спеціалізованому морському судні, призначеному для перевезення контейнерів. Дизелі передавали свою потужність через редуктор на один гвинт відповідно до схеми, яка показана на рис. 4.

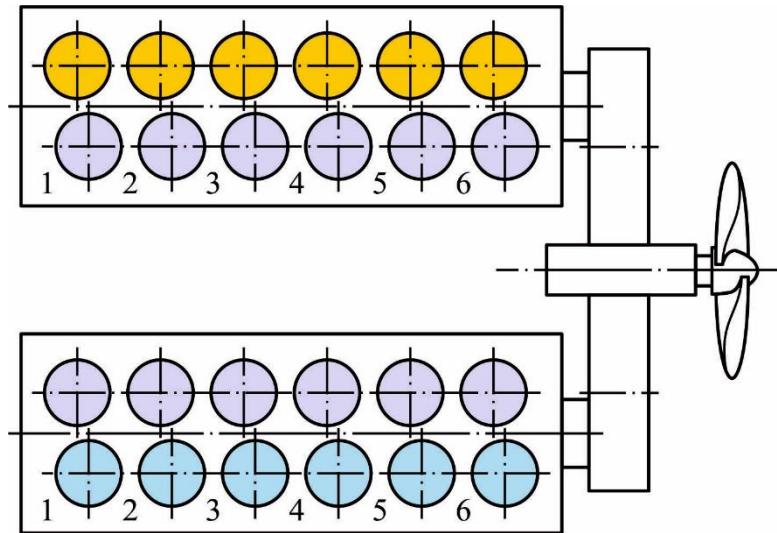


Рисунок 4 – Схема проведення експерименту на судових дизелях 12V32/40 MAN-Diesel&Turbo (жовті та блакитні – такі, вкладиші підшипників яких покривались шаром епіламу; сірі – такі, вкладиші підшипників яких не покривались шаром епіламу)

Дизелі експлуатувалися при однаковому навантаженні, з використанням однакових сортів палива і мастила. Під час експлуатації дизелів поза спеціальними екологічними зонами – Sulfur Emission Control Areas (SECAs) [28, 29] використовувалось паливо RMG380 з вмістом сірки 0,048 %. Під час експлуатації дизелів в SECAs [30, 31] використовувалось паливо DMA з вмістом сірки 0,0076%. Протягом усього часу експерименту використовувалось моторне масло Castrol TLX PLUS 404 [32].

V-подібна компоновка дизеля дозволила обробити вкладиші підшипників одного з рядів циліндрів дизеля антифрикційним покриттям (епіламом). При цьому вкладиші підшипників іншого ряду циліндрів не оброблялися епіламом. Таким чином, для кожного з дизелів вкладиші підшипників одного ряду циліндрів (жовтий і блакитний на рис. 4) оброблялися епіламом, вкладиші іншого ряду циліндрів (сірі на рис. 4) – не оброблялися.

Дослідження проводилися в науковій лабораторії (перший і другий етапи), а також на дизелях спеціалізованого морського судна (третій етап).

Першим етапом досліджень було визначення оптимального часу нанесення епіламів на металеву поверхню, а також вибір епіламів, які забезпечують формування граничних змащувальних шарів з найбільшою товщиною та кутом змочування. Результати, що були отримані під час вимірів, наведені в табл. 1. Номограма, яка характеризує товщину адсорбованого шару різних епіламів в залежності від часу їх нанесення, показана на рис. 5.

Таблиця 1 – Результати визначення адсорбованої товщини шару епіламів Aqualin, Efren-K, Polisam-20

Час нанесення епіламу, t , хв	Товщина шару епіламу, h , нм		
	1	2	3
2	4,8	7,7	9,1
4	9,3	12,3	13,2
6	10,3	16,6	14,7
8	10,7	17,2	14,9
10	11,2	17,4	15,2

Примітка: нумерація епіламів виконана у довільній формі

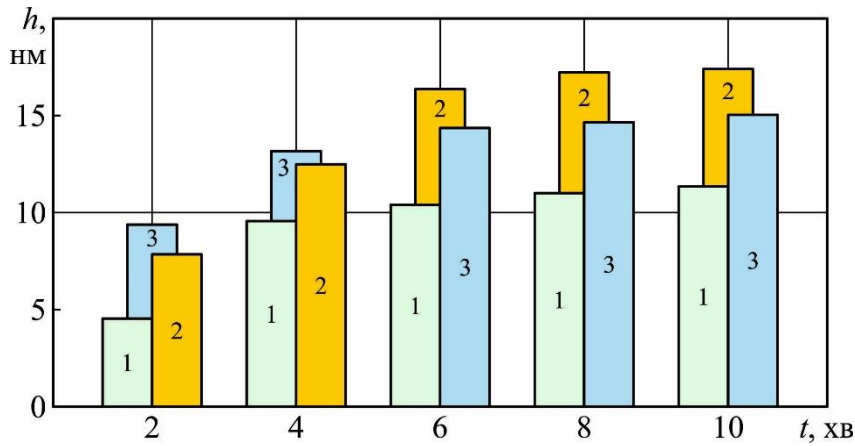


Рисунок 5 – Залежність товщини органічного покриття (епілами Aqualin, Efren-K, Polisam-20) від часу нанесення. Нумерація епіламів виконана у довільній формі

Наведені дані (табл. 1 та рис. 5), свідчать, що після 6...10 хв нанесення товщина адсорбційного шару епіламу на металевій поверхні стабілізується та для різних епіламів знаходиться в діапазоні 11,2...17,4 нм.

Метою другого етапу досліджень було визначення впливу епіламів на структурні характеристики граничних змащувальних шарів. Результати цих експериментів наведені в таблиці 2 і на рис. 6. При цьому під позначенням ММ розуміється безпосередня товщина граничного шару моторного мастила d_s , який утворюється на металевій поверхні, а також значення його кутів змочування θ . Під позначенням 1, 2, 3 розуміється товщина граничного шару масла d_s , який утворюється на тій самій поверхні за умовою її покриття шаром епіламу, а також значення кутів змочування моторного мастила θ .

Таблиця 2 – Результати визначення структурних характеристик граничного моторного шару мастила за умовою нанесенні на металеву поверхню шару епіламів Aqualin, Efren-K, Polisam-20

Тип покриття поверхні	Структурна характеристика граничного шару мастила	
	товщина, мкм	крайовий кут змочування, град
Без покриття	12,3	10,2
1	15,2	15,8
2	18,3	17,4
3	17,2	16,3

Примітка: нумерація епіламів виконана в довільній формі

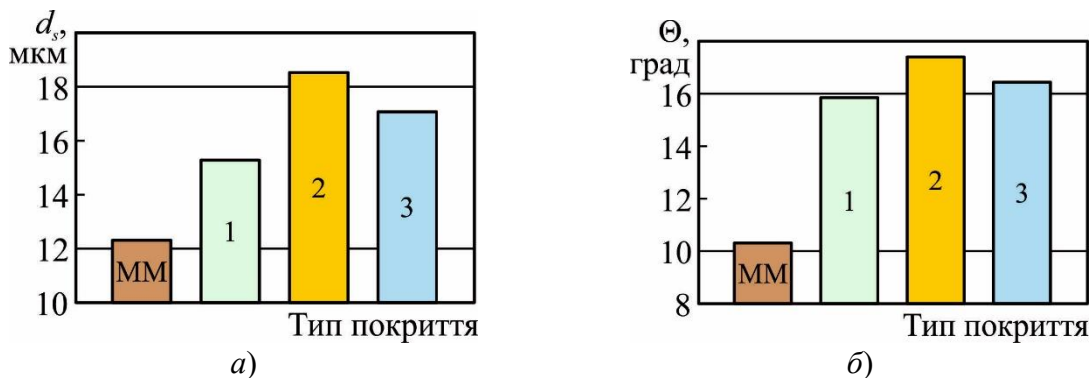


Рисунок 6 – Зміна товщини d_s та кута змочування θ граничного шару мастила за умовою нанесення на металеву поверхню різних епіламів:

ММ – відсутність покриття (товщина граничного шару мастила); 1, 2, 3 – покриття різними епіламами

Наведені результати свідчать, що епіламування забезпечує 1,23...1,40 кратне збільшення товщини граничного шару мастила, а також 1,55...1,60 кратне збільшення кутів змочування.

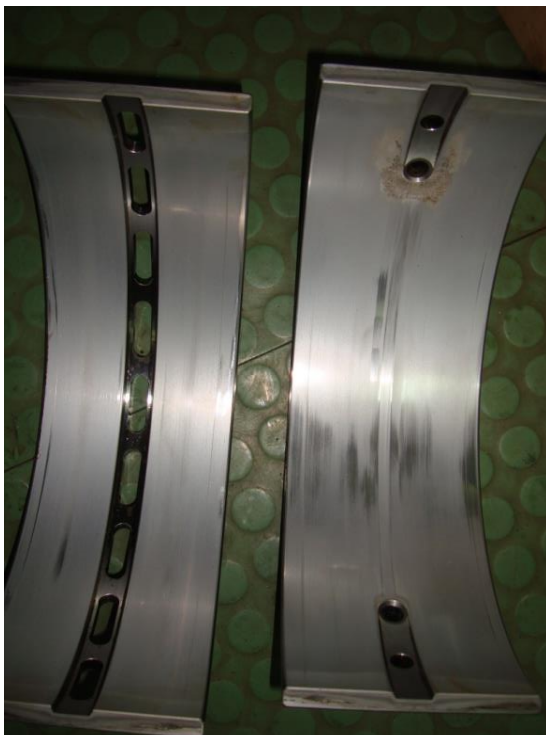
Враховуючи результати першого і другого етапів досліджень (які представлені в таблицях 1, 2 та на рис. 5, 6), третій етап проводився з використанням епіламів 2 і 3. Саме ці епілами забезпечили утворення на металевій поверхні граничних шарів з найбільшою товщиною та кутами змочування.

Даний етап досліджень виконувався на морських дизелях 12V32/40 MAN-Diesel&Turbo. Вкладиші підшипників одного ряду циліндрів дизеля правого борту були покриті епіламом 2 (жовтий ряд циліндрів на рис. 4). Вкладиші підшипників одного ряду циліндрів дизеля лівого борту були покриті епіламом 3 (синій ряд циліндрів на рис. 4). Кожен з дизелів мав ряд циліндрів, вкладиші яких не були покриті епіламом (сірі ряди циліндрів на рис. 4).

Для визначення впливу антифрикційних покриттів (епіламів) на технічний стан вкладишів підшипників по закінченні регламентного терміну експлуатації підшипникових вузлів проводилась оцінка зносу їх несучих поверхонь. Для цієї мети визначався знос вкладишів підшипників. Стан вкладишів підшипників, які не були покриті епіламом, показано на рис. 7. Стан вкладишів підшипників, які були покриті епіламом, показано на рис. 8.

Ураховуючи нерівномірність навантаження на різні циліндри дизеля, технічний стан підшипникових вузлів відрізняється один від одного. Це особливо проявляється у нерівномірному зносі вкладишів підшипників. При цьому вкладиші циліндрів підшипників, що розташовані ближче до споживача енергії (гвинту або електричному генератору), мають більший знос порівняно з вкладишами, що знаходяться далі від споживача енергії.

Під час експериментів знос вкладиша для «кормового» підшипника (циліндра № 6) приймався за 100 %; знос інших вкладишів вимірювався у відносних одиницях до цього значення. Результати розрахунків наведені в таблиці 3 і на рис. 9.



Циліндр № 1



Циліндр № 2



Циліндр № 5



Циліндр № 6

Рисунок 7 – Стан підшипників дизеля 12V32/40 MAN-Diesel&Turbo, які експлуатувалися без нанесення шару епілама на їхню поверхню



Циліндр № 1



Циліндр № 2



Циліндр № 5



Циліндр № 6

Рисунок 8 – Стан вкладишів підшипників дизеля 12V32/40 MAN-Diesel&Turbo, експлуатація яких проводилася з нанесенням шару епіламу на їхню поверхню

Таблиця 3 – Знос вкладишів підшипників суднових дизелів 12V32/40 MAN-Diesel&Turbo за різних умов експлуатації

№ циліндра	Знос вкладишів підшипників (відносні одиниці)			
	MAN-Diesel&Turbo № 1 (дизель правого борту)		MAN-Diesel&Turbo № 2 (дизель лівого борту)	
	Без покриття поверхні	Покриття епіламом №2	Без покриття поверхні	Покриття епіламом №2
1	73	64	72	68
2	78	66	79	72
5	87	68	92	75
6	100	72	100	77

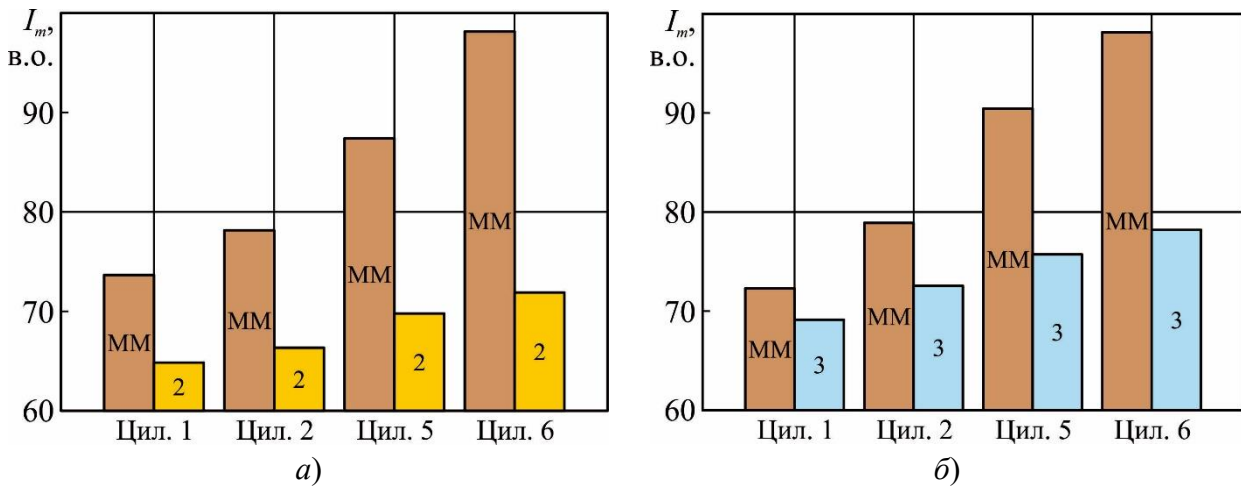


Рисунок 9 – Зношування вкладишів підшипників дизелів 12V32/40 MAN-Diesel&Turbo за різних умов експлуатації: (а) – дизель правого борту, епілам № 2; (б) – дизель лівого борту, епілам № 3

Підкреслимо, що результати з визначення зносу вкладишів підшипників різних дизелів (лівого і правого борту) у разі нанесення на їх поверхню епіламів 2 і 3, а також за умовою експлуатації вкладишів підшипників без нанесення на їх поверхню антифрикційних покриттів мають подібні значення. Це підтверджує правильність теоретичних припущень та коректність вимірювань.

Метод епіламування, що був використаний для нанесення антифрикційних покриттів на поверхні підшипників дизелів суднових енергетичних установок, не знайшов широкого розповсюдження в елементах суднових технічних засобів. Це пов'язано, зокрема, з консервативністю суднової енергетики як науки та прагненням екіпажу судна уникнути додаткових ризиків, що виникають під час впровадження інноваційних ідей. Особливо це стосується таких відповідальних вузлів, як судові дизелі. Однак, за умовою якісних попередніх досліджень та дотримання технології нанесення епіламів на поверхні, можливо забезпечити режими, сприятливі для підвищення їх експлуатаційних характеристик і технічного стану [33].

Усі дослідження виконувались на енергетичних установках, які мають діючі сертифікати класифікаційних товариств (зокрема, міжнародного реєстру Lloyd's Register of Shipping, Англія; Американського Бюро Судноплавства, ABS, США). Під час проведення експериментів експлуатація суден, дизелів та систем, що забезпечують їх функціонування, виконувалась відповідно до вимог Міжнародної Конвенції SOLAS, Міжнародної Конвенції MARPOL, а також інструкцій з експлуатації.

Висновки. Проведені дослідження та отримані результати дозволяють зробити наступні висновки:

1. З метою забезпечення технічного стану вкладишів підшипників суднових дизелів може бути використано метод епіламування їх поверхонь, який сприяє зниженню контактних навантажень.

2. Товщина шару епіламу, що адсорбується на поверхні вкладишів підшипників суднових дизелів, може досягати 11,2...17,4 нм, а час для його адсорбції не перевищує 10 хвилин.

3. Нанослой епіламів, нанесений на металеву поверхню, підвищує структурні характеристики граничного шару мастила. Це виявляється в збільшенні його товщини та кутів змочування – параметрів, що сприяють підвищенню пружно-демпфуючих властивостей мастила та розклинювального тиску в трибологічній системі метал – мастильний шар – метал. У виконаних дослідженнях збільшення цих параметрів становило:

- для товщини граничного шару мастила від 12,3 мкм (в разі експлуатації без нанесення епіламів) до 15,2...18,3 мкм (за умовою використання різних епіламів);

- для кута змочування від 10,2° (в разі експлуатації без нанесення епіламів) до 15,8...17,4 (в разі використання різних епіламів).

4. Підвищення структурних характеристик граничного шару мастила за рахунок епіламування поверхонь вкладишів підшипників значно зменшує їх знос. Для суднового дизеля 12V32/40 MAN-Diesel&Turbo експериментально встановлено, що епіламування забезпечує 1,1...1,4-кратне зменшення зносу поверхні вкладишів підшипників, а також поліпшує їхній технічний стан.

5. Епіламування відноситься до категорії сучасних нанотехнологічних методів. Цей метод вимагає попередніх досліджень для визначення оптимальних видів антифрикційних покриттів (епіламів) та часу їх нанесення на поверхні, але при цьому не викликає додаткових трудовитрат під час його використання, а також підвищується енергоефективність трибологічних систем суднових дизелів та суднових технічних засобів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Sagin S., Madey V., Sagin A., Stoliaryk T., Fomin O., Kučera P. Ensuring Reliable and Safe Operation of Trunk Diesel Engines of Marine Transport Vessels // *Journal Marine Science and Engineering*. – 2022. – Vol. 10. – Iss. 10. – P. 1373. <https://doi.org/10.3390/jmse10101373>.
2. Дакі О.А., Пліта Л.Л., Трофименко І.В., Федунів В.М. Особливості та вимоги щодо навігаційного забезпечення безпеки судноводіння на внутрішніх судноплавних шляхах // *Водний транспорт. Збірник наукових праць*. – 2022. – Вип. 2(36). – С. 184-194. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.15.
3. Тимошук О.М., Боріна М.В. Дослідження методів підвищення екологічності суднових енергетичних установок у водному середовищі // *Водний транспорт. Збірник наукових праць*. – 2022. – Вип. 2(36). – С. 240-252. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.21.
4. Сагін С.В., Сагін А.С. Контроль та діагностування надійності та економічності дизелів морських та річкових засобів транспорту // *Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник*. – 2023. – Вип. 46. – С. 118-131. [doi: 10.31653/smf46.2023.118-131](https://doi.org/10.31653/smf46.2023.118-131).
5. Сагін С.В., Заблоцкий Ю.В., Перунов Р.В. Технология использования и результаты испытаний присадок к топливам для судовых дизелей // *Проблеми техніки: наук.-виробн. журнал*. – 2012. – № 3. – Одеса: ОНМУ. – С. 84-103.
6. Lovska A., Fomin O., Pistek V., Kucera P. Dynamic load modelling within combined transport trains during transportation on a railway ferry // *Appl. Sci.* – 2020. – Vol. 10. – P. 5710. <https://doi.org/10.3390/app10165710>.
7. Сагін С. В. Зниження механічних втрат у суднових середньооберткових дизелях за рахунок оптимізації роботи циркуляційних систем мащення // *Вісник Одеського національного морського університету : Зб. наук. праць*. – 2020. – Вип. 1(61). – С. 87-96. [doi.org 10.47049/2226-1893-2020-1-87-96](https://doi.org/10.47049/2226-1893-2020-1-87-96).
8. Sagin S.V. Determination of the optimal recovery time of the rheological characteristics of marine diesel engine lubricating oils // *Materials of the International Conference “Process Management and Scientific Developments” (Birmingham, United Kingdom, January 16, 2020. Part 4)*. – P. 195-202. DOI. [10.34660/INF.2020.4.52991](https://doi.org/10.34660/INF.2020.4.52991).
9. Поповский А.Ю., Сагін С.В. Комплексная оценка эксплуатационных характеристик смазочных углеводородных жидкостей // *Автоматизация судовых технических средств : науч.-техн. сборник*. – 2014. – Вип. 20. – С. 74-83.
10. Тимошук О.М, Мельник О.В. Дослідження безпеки бункерування на водному транспорті // *Водний транспорт. Збірник наукових праць*. – 2020. – Вип. 1(29). – С. 5-13. doi.org/10.33298/2226-8553/2020.1.29.01.

11. Богом'я В.І., Бажак О.В. Методика планування випробувань зразків обладнання засобів водного транспорту на безвідмовність // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2022. – Вип. 1(35). – С. 25-32. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.1.35.03.
12. Сагін С.В., Бондар С.А., Столярик Т.О. Оцінка безвідмовності судових дизелів за технічним станом моторного мастила циркуляційних систем мащення // Водний транспорт. – 2023. – № 1(37). – С. 59-70. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.06.
13. Fomin O., Lovska A., Kučera P., Pištěk V. Substantiation of Improvements for the Bearing Structure of an Open Car to Provide a Higher Security during Rail/Sea Transportation // J. Mar. Sci. Eng. – 2021. Vol. 9. – P. 873. https://doi.org/10.3390/jmse9080873.
14. Сагін С.В., Сагін С.С. Використання штучного інтелекту в ситуаціях надмірного зближення суден // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 1(39). – С. 215-225. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.22.
15. Мацкевич Д.В., Сагін С.В., Ханмамедов С.А. Изменение реологических характеристик смазочных материалов в циркуляционной масляной системе в процессе эксплуатации среднеоборотного двигателя // Судовые энергетические установки : науч.-техн. сб. – 2010. – Вып. 25. – С.109-118.
16. Сагін С.В. Повышение надежности работы прецизионных пар топливной аппаратуры судовых дизелей за счет использования органических покрытий // Вісник Одеськ. нац. мор. ун-ту. – 2018. – Вип. 4(57). – С. 109-120.
17. Сагін С.В. Зниження енергетичних втрат в прецизійних парах паливної апаратури судових дизелів // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2018. – Вип. 38. – С. 132-142.
18. Сагін С.В. Определение диапазона стратификации вязкости смазочного материала в трибологических системах судовых дизелей // Вісник Одеськ. нац. мор. ун-ту. – 2019. – Вип. 1(58). – С. 89-101.
19. Sagin S.V., Kuropyatnik A.A. Application of the system of recirculation of exhaust gases for the reduction of the concentration of nitric oxides in the exhaust gases of the ship diesels // American Scientific Journal. – 2017. – № 15. – Iss. 2. – P. 67-71.
20. Сагін С.В., Заблоцкий Ю.В., Перунов Р.В. Технология использования и результаты испытаний присадок к топливам для судовых дизелей // Проблемы техники: наук.-виробн. журнал. – 2012. – № 3. – С. 84-103.
21. Поповский А.Ю., Сагін С.В. Оценка эксплуатационных свойств смазочно-охлаждающих жидкостей судовых технических средств // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сборник. – 2016. – Вып. 22. – С. 66-74.
22. Зверьков Д.О., Сагін С.В. Зниження механічних втрат у судових дизелях // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 40. – С. 20-25. DOI : 10.31653/smf341.2020.20-25.
23. Сагін С.В., Куропятник А.А. Оптимизация режимов работы системы перепуска выпускных газов судовых среднеоборотных дизелей // Автоматизация судовых технических средств : науч.-техн. сб. – 2019. – Вып. 25. – С. 79-89.
24. Kuropyatnyk O.A., Sagin S.V. Exhaust Gas Recirculation as a Major Technique Designed to Reduce NOx Emissions from Marine Diesel Engines // Naše more: International Journal of Maritime Science and Technology. – 2019. – Vol. 66. – Iss. 1. – P. 1-9. https://doi.org/10.17818/NM/2019/1.1.
25. Сагін С.В., Мацкевич Д.В. Оптические характеристики граничных смазочных слоев масел, применяемых в циркуляционных системах судовых дизелей // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2011. – № 26. – С.116-125.
26. Vatulia G., Gerlici J., Fomin O., Lovska A., Fomina Y., Kravchenko K. Analysis of the Strength of the Supporting Structure of a TwoSection Hopper Wagon under Operating Loading Conditions // Appl. Sci. – 2023. – Vol. 13. – P. 859. https://doi.org/10.3390/app13020859.
27. Rymar T., Tatarchenko H., Fomin O., Pištěk V., Kučera P., Beran M., Burlutskyy O. The Study of Manufacturing Thermal Insulation Materials Based on Inorganic Polymers under Microwave Exposure // Polymers. – 2022. – Vol. 14. – P. 3202. https://doi.org/10.3390/polym14153202.

28. Куропятник А.А., Сагин С.В. Управление выпускными газами судовых дизелей для обеспечения экологических показателей // Автоматизация судовых технических средств : науч.-техн. сборник. – 2018. – Вып. 24. – С. 72-80.
29. Sagin S., Kuropyatnyk O., Sagin A., Tkachenko I., Fomin O., Píštěk V., Kučera P. Ensuring the Environmental Friendliness of Drillships during Their Operation in Special Ecological Regions of Northern Europe // *Journal Marine Science and Engineering*. – 2022. – Vol. 10(9). – P. 1331. <https://doi.org/10.3390/jmse10091331>.
30. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A., Zablotskyi Yu.V. Gaichenia O.V. Supplying of Marine Diesel Engine Ecological Parameters // *Nase More : International Journal of Maritime Science and Technology*. – 2022.– Vol. 69(1). – P. 53-61. DOI 10.17818/NM/2022/1.7.
31. Sagin S.V., Sagin S.S., Fomin O., Gaichenia O., Zablotskyi Y., Píštěk V., Kučera P. Use of biofuels in marine diesel engines for sustainable and safe maritime transport // *Renewable Energy*. – 2024. – P. 120221. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120221>.
32. Sagin S.V. Improving the performance parameters of systems fluids // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences, Vienna*. –2018. – № 7-8. – P. 55-59. doi.org/10.29013/AJT-18-7.8-55-59.
33. Тимочко О.І., Тимошук О.М., Руденко В.М., Сітков О.М. Ситуаційна обізнаність операторів берегових центрів управління як основна передумова безпечної експлуатації безпілотних суден. // *Водний транспорт. Збірник наукових праць*. – 2024. – Вип. 1(39). – С. 49-58. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.05.

REFERENCES

1. Sagin S., Madey V., Sagin A. Stoliaryk T., Fomin O., Kučera P. Ensuring Reliable and Safe Operation of Trunk Diesel Engines of Marine Transport Vessels // *Journal Marine Science and Engineering*. – 2022. –Vol. 10. – Iss. 10. – P. 1373. <https://doi.org/10.3390/jmse10101373>.
2. Daki O.A., Plita L.L., Trofymenko I.V., Fedunov V.M. Feature and requirements for navigational safety of navigation on inland waterways // *Water transport*. – 2022. – Vol. 2(36). – P. 184-194. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.15.
3. Tymoshchuk O., Borina M. Research of methods of enhancing the environmental facility of ship power plants in the aquatic environment // *Water transport*. – 2022. – Vol. 2(36). – P. 240-252. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.21.
4. Sagin S.V., Sagin A.S. Control and diagnosis of reliability and economy of diesel engines of sea and river means of transport // *Ship power plants*. – 2023. – Vol. 46. – P. 118-131. doi: 10.31653/smf46.2023.118-131.
5. Sagin S.V., Zablotsky Yu. V., Perunov R.V. Technology of use and test results of fuel additives for marine diesel engines // *Problems of technical*. – 2012. – Vol. 3. – P. 84-103.
6. Lovska A., Fomin O.; Pistek V., Kucera P. Dynamic load modelling within combined transport trains during transportation on a railway ferry // *Applied Science*. –2020. – Vol. 10. – P. 5710. <https://doi.org/10.3390/app10165710>.
7. Sagin S.V. Reduction of mechanical losses in marine medium-speed diesel engines due to optimization of lubrication circulation systems // *Herald of the Odessa National Maritime University*. – 2020. – Vol. 1(61). – P. 87 -96. doi.org 10.47049/2226-1893-2020-1-87-96.
8. Sagin S.V. Determination of the optimal recovery time of the rheological characteristics of marine diesel engine lubricating oils // *Materials of the International Conference “Process Management and Scientific Developments”* (Birmingham, United Kingdom, January 16, 2020. Part 4). – P. 195-202. DOI. 10.34660/INF.2020.4.52991.
9. Popovskii A.Y., Sagin S.V. Complex assessment of operational characteristics of lubricating hydrocarbon liquids // *Automation of ship facilities*. – 2014. – №20. – P. 74-83.
10. Timoshchuk O.M., Melnik O.V. Research of safety of bunking on maritime transport // *Water transport*. – 2020. – Vol. 1(29). – P. 5-13. doi.org/10.33298/2226-8553/2020.1.29.01.

11. Bohomia V., Bazhak O. // Water transport – 2022. – Vol. 1(35). – P. 25-32. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.1.35.03.
12. Sagin S.V., Bondar S.A., Stoliaryk T.O. Assessment of the reliability of marine diesel engines according to the technical condition of engine oil of circulating lubrication systems // Water transport. – 2023. – Vol. 1(37). – P. 59-70. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.06.
13. Fomin O., Lovska A., Kučera P., Pištěk V. Substantiation of Improvements for the Bearing Structure of an Open Car to Provide a Higher Security during Rail/Sea Transportation // Journal Marine Science and Engineering. – 2021. Vol. 9. – P. 873. https://doi.org/10.3390/jmse9080873.
14. Sagin S.S., Sagin S.V., Use of artificial intelligence in the situations of excessive vessel // Water transport. – 2024. – Vol. 1(39). – P. 215-225. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.22.
15. Matskevych D.V., Sagin S.V., Hanmamedov S.A. Changes in the rheological characteristics of lubricants in the circulating oil system during operation of a medium-speed engine // Ship power plants. – 2010. – Vol. 25. – P. 109-118.
16. Sagin S.V. Increasing the reliability of precision pairs of marine diesel fuel equipment through the use of organic coatings // Herald of the Odessa National Maritime University. – 2018. – Vol. 4(57). – P. 109-120.
17. Sagin S.V. Reduction of energy losses in precision steam fuel equipment of marine diesel engines // Ship power plants. – 2018. – Vol. 38. – P. 132-142.
18. Sagin S.V. Determination of the range of lubricant viscosity stratification in tribological systems of marine diesel engines // Herald of the Odessa National Maritime University. – 2019. – Vol. 1(58). – P. 89-100.
19. Sagin S.V., Kuropyatnyk A.A. Application of the system of recirculation of exhaust gases for the reduction of the concentration of nitric oxides in the exhaust gases of the ship diesels // American Scientific Journal. – 2017. – № 15. – Iss. 2. – P. 67-71.
20. Sagin S.V., Zablotsky Yu.V., Perunov R.V. Technology of use and test results of fuel additives for marine diesel engines // Problems of technical. – 2012. – Vol. 3. – P. 84-103.
21. Popovskii A.Y., Sagin S.V. Evaluation of operational properties of lubricating and cooling liquids of marine technical equipment // Automation of ship technical facilities. – 2016. – Vol. 22. – P. 66-74.
22. Zverkov D.O., Sagin S.V. Reduction of mechanical losses in marine diesel engines // Ship power plants. – 2020. – Vol. 40. – P. 20-25. DOI : 10.31653/smf341.2020.20-25.
23. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Optimization of operating modes of the exhaust gas bypass system of marine medium-speed diesel engines // Automation of ship technical facilities. – 2019. – Vol. 25. – P. 79-89.
24. Kuropyatnyk O.A., Sagin S.V. Exhaust Gas Recirculation as a Major Technique Designed to Reduce NOx Emissions from Marine Diesel Engines // Naše more: International Journal of Maritime Science and Technology. – 2019. – Vol. 66. – Iss. 1. – P. 1-9. https://doi.org/10.17818/NM/2019/1.1.
25. Sagin S.V., Matskevych D.V. Optical characteristics of boundary lubricating layers of oils used in circulation systems of marine diesel engines // Ship power plants. – 2011. – Vol. 26. – P. 116-125.
26. Vatulia G., Gerlici J., Fomin O., Lovska A., Fomina Y., Kravchenko K. Analysis of the Strength of the Supporting Structure of a TwoSection Hopper Wagon under Operating Loading Conditions // Applied Science. – 2023. – Vol. 13. – P. 859. https://doi.org/10.3390/app13020859.
27. Rymar T., Tatarchenko H., Fomin O., Pištěk V., Kučera P., Beran M., Burlutskyy O. The Study of Manufacturing Thermal Insulation Materials Based on Inorganic Polymers under Microwave Exposure // Polymers. – 2022. – Vol. 14. – P. 3202. https://doi.org/10.3390/polym14153202.
28. Kuropyatnyk O.A., Sagin S.V. Marine diesel exhaust gas management to ensure environmental performance // Automation of ship technical facilities. – 2018. – № 24. – P.72-80.
29. Sagin S., Kuropyatnyk O., Sagin A., Tkachenko I., Fomin O., Pištěk V., Kučera P. Ensuring the Environmental Friendliness of Drillships during Their Operation in Special Ecological Regions of Northern Europe // Journal Marine Science and Engineering. – 2022. – Vol. 10(9). – P. 1331. https://doi.org/10.3390/jmse10091331.

30. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A., Zablotskyi Yu.V. Gaichenia O.V. Supplying of Marine Diesel Engine Ecological Parameters // *Nase More : International Journal of Maritime Science and Technology*. – 2022.– Vol. 69(1). – P. 53-61. DOI 10.17818/NM/2022/1.7.
31. Sagin S.V., Sagin S.S., Fomin O., Gaichenia O., Zablotskyi Y., Pí'st'ek V., Kučera P. Use of biofuels in marine diesel engines for sustainable and safe maritime transport // *Renewable Energy*. – 2024. – P. 120221. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120221>.
32. Sagin S.V. Improving the performance parameters of systems fluids // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences, Vienna*. –2018. – № 7-8. – P. 55-59. doi.org/10.29013/AJT-18-7.8-55-59.
33. Tymochko O.I., Tymoshchuk O.M., Rudenko V.M., Sitkov O.M. Situational awareness of operators of coastal control centers as a basic prerequisite for the safe operation of autonomous unmanned vessels // *Water transport*. – 2024. – Vol. 1(39). – С. 49-58. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.05.

Sergii Sagin, Arsenii Sagin, Yurii Zablotskyi, Oleksij Fomin

ENSURING THE TECHNICAL CONDITION OF THE BEARINGS OF MARINE DIESEL ENGINES

The purpose of the investigation was to identify the influx of antifriction coatings into the technical mill of marine diesel bearings. In the antifriction coatings, various saws were applied, a thin ball of which was applied to the surface of the bearing shells of marine diesel engines 12V32/40 MAN-Diesel&Turbo. The thickness of the epilam ball, which is adsorbed on the metal surface, was controlled by ellipsometry. It was found that the thickness of the epilamium ball on the surface of the bearing shells of marine diesel engines can reach 11.2-17.4 nm. In this case, the hour required for its adsorption does not exceed 10 minutes. It has been shown that nanoballs of epilamics, applied on a metal surface, lead to an increase in the structural characteristics of the boundary ball of the olive: thickness (from 12.3 μm to 15.2-18.3 μm), marginal cutives of moisture (from 10.2° to 15.8-17.4°). It has been experimentally confirmed that waxing the surface of bearing shells can significantly reduce their wear. For the marine diesel engine 12V32/40 MAN-Diesel&Turbo, it was experimentally established that epilamination will provide a 1.1-1.4-fold reduction in wear on the surface of the bearing shells, as well as their shorter technical production.

Key words: anti-friction coatings, bearing liner, boundary layer, engine oil, epilam, lubrication system, marine diesel, sliding bearing, technical condition, wear.