

УДК 621.824.539.4

ARTICLE HISTORY

Received 09.03.2023

Accepted 17.03.2023

Кобзарук Олександр Васильович¹, Бабінець Валерій Іванович²,
Опарін Анатолій Володимирович³, Смажило Богдан Васильович⁴
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна^{1, 4},
Чорноморськ, Україна²,
НУ «Одеська морська академія», Одеса, Україна³,
al38od@i.ua¹, babinecvalerij@gmail.com²,
avoparin@ukr.net³, bogdan@gmail.com⁴

Технологія протикорозійного захисту поверхонь між шийками суднових гребних валів

Kobzaruk Olexander¹, Babinets Valery²,
Oparin Anatoly³, Smazhylo Bogdan⁴
Odessa National Maritime University, Odesa, Ukraine^{1, 4},
Chornomorsk, Ukraine²,
National University «Odessa Maritime Academy»³,
al38od@i.ua¹, babinecvalerij@gmail.com², avoparin@ukr.net³,
bogdan@gmail.com⁴

Technology of anti-corrosion protection of the surfaces between the necks of ship rear shafts

Резюме – Пропонується технологія захисту від корозійно-механічного пошкодження поверхонь суднових гребних валів в проміжках між робочими шийками ізоляційною стрічкою, що термоусаджується. Проведені випробування фізико-механічних властивостей захисного матеріалу, його водопоглинання та стійкості до корозійно-біологічного впливу морської води. Корозійно-втомні випробування дослідних зразків з покриттям та без нього здійснено у природній морській воді на базі 50·10⁶ циклів. Дослідженнями показана висока надійність захисту неробочих шийок суднових гребних валів від корозійно-втомних пошкоджень в морській воді. Технологія захисту опробувана на судноремонтних підприємствах та схвалена класифікаційним товариством.

Abstract – The technology of protection against corrosion-mechanical

damage to the surfaces of ship propeller shafts between its working necks with a heat-shrinkable insulating tape is presented. The physical and mechanical properties of the protective material, its water absorption, and resistance to the corrosion and biological effects of sea water were tested. Corrosion-fatigue tests of prototypes in seawater were carried out based on 50-10⁶ cycles. Tests have shown the high reliability of protection of non-working journals of marine propeller shafts from corrosion-fatigue damage in seawater. The protection technology was tested at shipyards and approved by classification society.

DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-39-51

Гвинторульовий комплекс є одним з важливих облаштувань судна. Знос одного з його елементів – гребного валу – і втрата свого функціонального призначення призводить до неможливості подальшої експлуатації судна, а в деяких випадках до катастрофи у відкритому морі. Вивченню питання підвищення надійності гвинторульового комплексу судна і збільшення експлуатаційного терміну його служби присвячено безліч робіт вітчизняних і зарубіжних учених [1 – 7]. Корозійно-втомне руйнування валу відбувається при одночасній дії змінної напруги і агресивного середовища [8]. Для звичайного втомного руйнування, як правило, окрім основної тріщини втоми, по якій відбувається руйнування, ніяких інших тріщин не спостерігається. При корозійно-втомному руйнуванні в зоні дії однакової напруги зазвичай спостерігається велика кількість тріщин корозійної втоми. В результаті місцевої мікропластичної деформації, що протікає при циклічних діях як вище, так і нижче межі втоми, в окремих найбільш слабких мікрооб'ємах металу відбувається розблагороджування цих мікрооб'ємів. Міра цього процесу (величина негативного електродного потенціалу) значно зростає завдяки тому, що взаємодія з корозійним середовищем відбувається в процесі мікропластичної деформації, тобто в процесі переміщення атомів. В цьому випадку набагато полегшується вихід іон-атомів з металу в розчин.

Це призводить до появи, в процесі корозійної втоми осередків з великою електрохімічною неоднорідністю, в яких зароджуються і розвиваються тріщини корозійно-втомного походження.

Тому для захисту від зниження корозійно-втомної міцності необхідне усунення або зменшення дії корозійного чинника. Найкращим рішенням в цьому випадку є підвищення корозійно-втомної міцності до її значення на повітрі [9].

Гребний вал представляє собою циліндричну цілісну або порожнисту ступінчасту балку, на якій знаходяться конуса, виточки,

штопочні пази, отвори, галтелі і інші конструктивні елементи, що є концентраторами напруги. В процесі експлуатації навантаження, що діють на вал, і дія морської води істотно знижують межу витривалості матеріалу валу.

Одним з найбільш поширених способів захисту гребних валів від дії морської води є електролітичне хромування його поверхні. Хромування відноситься до катодних покриттів, що мають позитивніший потенціал, ніж потенціал металу, що захищається.

Багато гальванічних покриттів знижують витривалість середньовуглецевої сталі на повітрі на 10 ... 35 % і більше. Хромування негативно впливає на опір втоми сталі не тільки на повітрі, а й у такому агресивному середовищі, як 3 % розчин NaCl або морська вода. Гальванічне хромування, незалежно від методів та режимів його здійснення, не забезпечує помітного підвищення опору корозійно-втомному руйнуванню через високу пористість покриття. Про суттєвий вплив наводорожування на зниження витривалості валів з гальванічним покриттям свідчить і те, що зі збільшенням товщини хромового покриття в інтервалі 0,3 ... 3,0 мм, опір втоми зразків діаметром 10 мм знижується. З іншого боку, в осаджених електролітичних шарах хрому виникають значні залишкові напруги розтягування, що іноді досягають межі плинності, які здатні викликати появу мікроскопічних тріщин. Ці тріщини не тільки стають концентраторами напруги, але, виходячи на поверхню хромового покриття, відкривають доступ до основного металу зовнішнього середовища, викликаючи його корозію. При цьому міцність зчеплення хромового покриття із поверхнею валу різко зменшується. Відбувається відшаровування локальних ділянок покриття, що порушує геометрію хромованих поверхонь. Тому гальванічні катодні покриття не рекомендується застосовувати для захисту від корозійно-втомного руйнування гребних валів, що працюють при одночасній дії змінних напруг і корозії. Одним із способів підвищення корозійно-втомної міцності хромованих гребних валів є їх поверхнєве зміцнення. Встановлено що, якщо перед електролітичним хромуванням поверхню гребного валу, що захищається, зміцнити вібродинамічним способом, то залишкові напруги стиснення алгебраїчно підсумовуючись з залишковими напругами розтягування від електролітичного хромування, можуть значно підвищити опір втоми, в тому числі і корозійної.

Результати випробувань на втому показують, що хромування без попереднього зміцнення на 46 % знижують межу витривалості матеріалу на повітрі та практично дорівнює вихідному матеріалу, випробуваному в морській воді. При попередньому динамічному

зміцненні поверхні перед хромуванням [10, 11] межа витривалості хромованих зразків, випробуваних у морській воді, наблизилась до межі витривалості вихідного (не хромованого) матеріалу, випробуваного на повітрі. Але на практиці зустрічаються конструкції гребних валів, поверхню яких захистити в такий спосіб неможливо чи нанесення протикорозійного захисту пов'язане з технологічними труднощами [12]. Наприклад, захист гребного валу завдовжки понад 20 м (рис. 1).

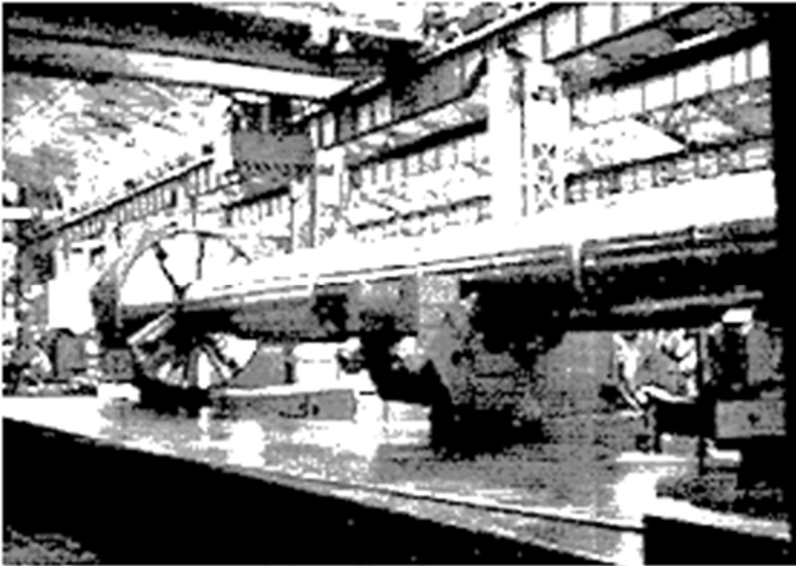


Рис 1. Гребний вал великотоннажного судна на токарному верстаті

Одним з таких способів захисту поверхонь виробів машинобудування від корозії є застосування термоусаджувального пластмас – радіаційно вулканізованого поліетилену, виконаного, наприклад, у вигляді ізоляційної стрічки, що термоусаджується. Застосування термоусаджувальної ізоляційної стрічки, як показала практика, є доцільним для захисту зовнішніх поверхонь гребних валів великої довжини.

Метою даної роботи є розробка технології протикорозійного захисту поверхні гребного валу між його робочими шийками.

Для розробки технології протикорозійного захисту поверхні гребного валу між його робочими шийками були проведені

дослідження фізико-механічних властивостей матеріалу, що застосовується для захисту валу і корозійно-втомні випробування моделей валів з використанням, для їх захисту, ізоляційної стрічки ЛПІ 823, що термоусаджується. Стрічка являє собою рулонний двошаровий матеріал, що складається з основи та адгезиву, виготовлений методом співекструзії. Базовим матеріалом основи є поліетилен високої густини. Адгезив виготовляється на основі сополімеру етилену з вінілацетатом із вмістом вінілацетатних груп.

Стрічка, що виготовляється, має товщину основи 0,6 ... 0,8 мм і адгезиву 0,3 ... 0,5 мм. Ширина стрічки 450 мм та довжини в рулоні 80 м. Стрічка експлуатується в інтервалі температур від -45°C до $+80^{\circ}\text{C}$. Адгезія підшару до очищеної поверхні гребного валу (з севіленовою композицією) становить 9 ... 12 МПа.

Основа ізоляційної стрічки, нанесеної на гарячу поверхню гребного валу, має високу міцність і стійкість до розтріскування в морській воді.

З метою вибору оптимального режиму нагрівання валу при формуванні міцного адгезійного шару системи «вал-покриття» проведено випробування залежності міцності адгезійного з'єднання стрічки з поверхнею сталі за різних температур і часу формування шару покриття (табл. 1).

Таблиця 1

Міцність адгезійної сполуки

Температура формування, $^{\circ}\text{C}$	Міцність адгезійного шару, МПа
100	1,9
110	4,2
120	8,3
130	10,5
150	11,3
170	11,5
190	11,4

Вже при температурі 120°C міцність адгезійного з'єднання становить 8 МПа, що достатньо для міцності зчеплення стрічки з поверхнею, гребного валу, що захищається. Зростання температури до $150 \dots 170^{\circ}\text{C}$ значно підвищує величину адгезійної міцності, але подальше підвищення температури мало впливає на неї.

Залежність міцності адгезійного з'єднання стрічка-сталь від часу при температурі формування 170°C показана в табл. 2.

Таблиця 2

Залежність міцності від часу формування

Час формування, хв.	5	10	15	20	30	45
Міцність адгезійної сполуки, МПа	10,1	11,0	11,5	12,2	12,3	16,8

Судячи з цих даних для формування міцної адгезійної сполуки досить 5 хв. Показано, що порівняно невисока температура формування адгезійної сполуки (150 °С) забезпечує не тільки досить великі значення міцності адгезійної сполуки, але і високу її водостійкість. У цьому відношенні стрічка ЛПІ 823 вигідно відрізняється від більшості імпортних матеріалів аналогічного призначення.

При вивченні захисних властивостей ізоляційної двошарової стрічки було приділено увагу водопоглинанню, здатності сорбувати воду. Залежність водопоглинання від часу витримки та температури розчину показано у табл. 3.

Таблиця 3

Водопоглинання стрічки

Температура, °С	Водопоглинання, %, за час витримки		
	1 доба / 24 час	10 діб / 240 час	42 доби / 1008 час
20	0,14	0,19	0,22
40	0,22	0,32	0,32
100	0,65	1,50	6,11

Високі значення водопоглинання полімерних матеріалів при підвищених температурах пояснюються великою концентрацією гідроксильних функціональних груп композиції (аміно- і гідроксильних), наявності в обсязі полімеру деякої кількості порожнин, пов'язаних з частковим випаром продукту АГМ-9 в процесі переробки грануляту в стрічку в екструдері. Але при не надто високих температурах експонування (як у разі експлуатації гребних валів) сорбція води протікає лише незначною мірою.

З метою виявлення ефективності застосування полімерних покриттів для захисту гребних валів, що працюють в режимі змінних навантажень та в агресивному середовищі (морська вода), були проведені випробування чотирьох серій зразків (табл. 4).

Нормалізовані (нагрівання до 870 °С, охолодження на повітрі) циліндричні зразки Ø 27 мм з довжиною робочої частини 125 мм і загальною довжиною 285 мм зі сталі 45 випробовували на втому при чистому вигині на машині ФМІ-30 в природній морській воді, частотою 50 Гц і базі випробувань 50 · 106 циклів. Частина зразків випробовувалася у вихідному стані, інша частина із захистом термоусаджувальною полімерною стрічкою, третя без антикорозійного захисту, але з вібродинамічним зміцненням зовнішньої поверхні зразків і четверта з вібродинамічним зміцненням поверхні зразків, захищених стрічкою, що термоусаджується. Робоча поверхня частини зразків захищалася стрічкою таким чином, щоб торець захисного покриття був у зоні контакту з морською водою.

Таблиця 4
Фізико-хімічні та механічні властивості термоусаджувальної стрічки

Найменування параметрів, одиниці виміру	Норма з технологічної документації	Фактичне значення якості зразків
Руйнівна напруга при розтягуванні при 10 °С, МПа	не менше 120	140
Розривне подовження при 20 °С, %	не менше 300	600
Ступінь повної усадки в подовжньому напрямку при 120 °С, %	10 ... 30	30 ... 35
Зміна розміру в поперечному напрямку при 120 °С, %	не більше ±5	-5
Адгезійна міцність до сталі (формування при 170 °С протягом 15 хв.), МПа	не нижче 3,5	9 ... 12
Адгезійна міцність до заводського покриття, МПа	не нижче 3,5	8 ... 11
Температура крихкості, °С	не нижче -50	не вище -50

Метою таких випробувань була перевірка герметичності адгезиву стрічки при дії середовища та змінних навантажень. Всі випробування проводилися в проточній морській воді, що забирається з моря безпосередньо у видатковий бак, звідки самопливом вона надходила на спеціальний гребінець з отворами на робочу поверхню зразка, за нормальної температури лабораторного повітря (18 ... 22 °С).

Циркуляція корозійного середовища проводилася зі швидкістю 3 л/хв. У процесі випробувань робоча частина зразка безперервно зрешувалася, внаслідок чого при працюючій установці на зразку утворювалася повітряно водяна плівка.

Результатом втомних випробувань показано, що межа корозійної втоми вихідних зразків без зміцнення та захисту на базі $50 \cdot 10^6$ циклів у морській воді становила 80 МПа; не зміцнених та захищених термострічкою – 100 МПа; зміцнених без захисту – 220 МПа; зміцнених із полімерним захистом – 240 МПа; вихідних зразків на повітрі – 260 МПа. Межа витривалості зразків з вихідною поверхнею, захищеною стрічкою, що термоусаджується, і випробуваних у морській воді, склала 250 МПа. Незначне зниження опору втоми можна пояснити шорсткістю поверхні, необхідної підготовки поверхні перед нанесенням термострічки.

Обстеження робочої поверхні, що пройшли випробування зразків із захисним покриттям, показало, що проникнення середовища під захисне покриття не було. Адгезійний підшар надійно з'єднує полімерний захисний шар з металевою поверхнею валу.

Були також проведені порівняльні випробування фізико-механічних характеристик термоусаджувальної ізоляційної стрічки у вихідному стані та після випробувань протягом 25 діб на біостійкість для вирішення питання про стійкість полімерів до корозійно-біологічного впливу морської води. Випробування на біостійкість проведені в середовищі з асоціативною культурою бактерій, що моделюють умови, що складаються під багаторічним обростанням [13].

Висновки. В результаті проведених випробувань можна зробити такі висновки:

захисна стрічка анізотропна – п характеристики міцності зразків стрічки у взаємно перпендикулярному напрямку відрізняються один від одного приблизно на 30 %, пластичні властивості – на 10 ... 15 %;

міцність зразків плівки після випробувань на біостійкість зменшилася незначно та становить близько 90 % від міцності плівки у вихідному стані, відносна залишкова деформація збільшилася приблизно на 80 %;

випробуваннями показано доцільність та ефективність застосування, як захист, термоусаджованої ізоляційної стрічки для підвищення довговічності та надійності гребних валів в експлуатаційних умовах.

Вперше використання антикорозійного захисту гребних валів термоусаджувальною ізоляційною стрічкою в один шар випробувано на практиці, при ремонті заводського буксиру та одного із суден

рибного флоту, на двох судноремонтних підприємствах. Ця технологія була схвалена класифікаційним товариством і рекомендована як заміна епоксидно-скловолокнистого захисту гребних валів між робочими шийками.

Застосування технології нанесення антикорозійного покриття включає режим очищення не робочих поверхонь гребного валу в циліндричній його частині, технологічні параметри нагріву і режим нанесення термоусаджувальної стрічки, а також вимоги безпеки при проведенні робіт.

Для можливості реалізації технології антикорозійного захисту валів необхідно мати виробниче приміщення для дробоструминного очищення гребних валів та виробничі площі для нанесення захисного покриття.

Приміщення, де проводиться нанесення покриття, має бути облаштовано:

токарним верстатом, що дозволяє обертати вал різної довжини під час нагрівання та нанесення покриття;

припливно-витяжною вентиляцією;

індукційним нагрівачем або іншим джерелом струму високої частоти, що забезпечує нагрівання поверхні валу з подальшим нанесенням термоусаджувальної ізоляційної стрічки (рис. 2);

підйомним краном для встановлення гребного валу на верстат та можливості його подальшого транспортування.

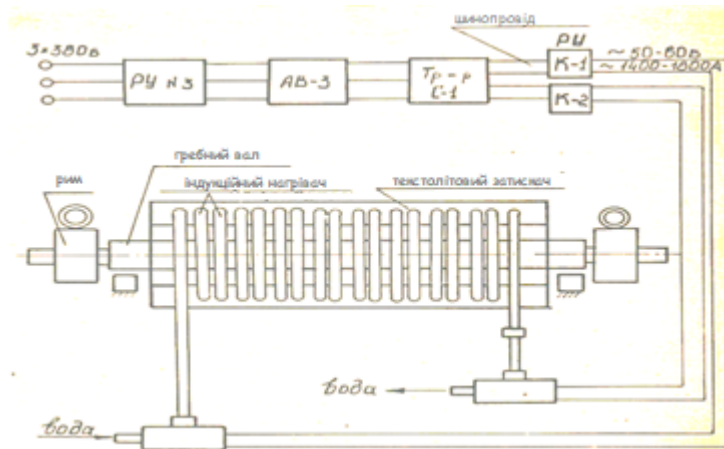


Рис. 2. Принципова схема підключення індукційного нагрівача

Технологія нанесення захисного покриття

Нанесення захисного покриття ЛПІ-823 доцільно здійснювати в наступній послідовності:

попереднє знежирення валу від мастил шляхом протирання ганчіркою, змоченою одним із розчинників (бензин ГОСТ 3134-78, бензин БР-1 ГОСТ 443-76 та ін.);

очищення гребного валу у дробоструминному апараті або за допомогою сталевих циліндричних щіток, що обертаються до отримання поверхні сірого металевого кольору, при цьому бажано наносити покриття відразу після очищення (необхідно ретельно стежити, щоб після очищення на поверхню не потрапили масляні та інші забруднення);

підготовка облицювання згідно зі схемою на рис. 3;

введення нагрівача індуктора на циліндричну частину валу та закріплення його в супорті різцетримача;

знежирення дробоструминних ділянок;

нагрівання циліндричної частини валу індукційним нагрівачем до температури 180 ... 200 °С включивши самохід супорта із закріпленням на ньому індуктором та пройшовши 2 ... 3 проходи у прямому та зворотному напрямку, прибрати індуктор з поверхні валу;

нанесення на підготовлені ділянки валу, що захищаються, термоусаджувальної ізоляційної стрічки намотуванням у два шари з мінімальною товщиною покриття 1 мм;

підготовка облицювання згідно зі схемою на рис. 3, діаметр робочих шийок валу повинен бути більшим за неробочу частину валу, з урахуванням нанесеного захисного шару, на величину не менше ніж 0,5 мм (рис. 4);

нанесення на покриті стрічкою поверхню фторопластову плівку в один шар із натягом;

встановлення індуктору нагріву;

нагрівання валу із нанесеним захисним покриттям до температури 200 ... 210 °С (час витримки за вказаної температури 7 ... 10 хв), вал у процесі нанесення покриття та його природного остигання повинен обертатися;

після остигання покриття до температури 60 °С зняття фторопластової плівки та зняття валу з токарного верстата.

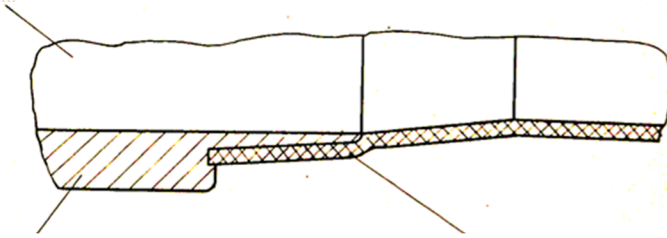


Рис. 3. Схема укладання стрічки

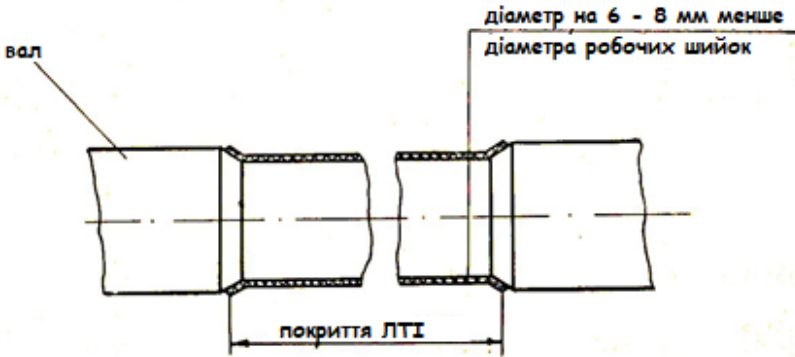


Рис. 4. Укладання стрічки на циліндричну поверхню

Таким чином можна **рекомендувати** наступне.

1. Зовнішню поверхню валів невеликої довжини можна піддавати електролітичному хромуванню з попереднім вібродинамічним поверхневим зміцненням.

2. На зовнішню поверхню довгомірних валів рекомендується наносити антикорозійне покриття у вигляді термоусаджувальної ізоляційної стрічки в один або два шари.

3. Для організації ділянки з нанесення захисного покриття необхідна виробнича площа з підйомно-транспортними засобами по довжині виробу, що обробляється, і шириною приблизно, 8 м, на якій будуть розміщені: токарний верстат, або роликові опори з можливістю передачі виробу обертального руху; пересувний пристрій для дробоструминного очищення поверхні валу, що захищається; стрічкономоточний пристрій; індукційний нагрівач та силовий трансформатор.

ЛІТЕРАТУРА
REFERENCES

1. Балацкий Л.Т. Ремонт гребных валов. – Одесса: Бюро технической информации ЧМП, 1970. – 59 с.
2. Похмурский В.И., Крахмальний А.М., Хома М.С. и др. Повышение сопротивления коррозионной усталости нержавеющей сталей для судовых валов // Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. «Проблемы повышения надёжности судовых валопроводов». – Л.: Судостроение, 1988. – С. 54 – 55.
3. Похмурский В.И., Кравцов Т.Г., Сирак Я.М. Циклическая прочность крупногабаритных образцов валов при наплавке аустенитной сталью по высокопрочному подслою // Тез. докл. Всесоюз. науч. техн. конф. «Проблемы повышения надёжности судовых валопроводов». – Л.: Судостроение, 1988. – С. 56 – 57.
4. Pemberton H.N., Smedly G.P. An Analysis of Resept Screwshaft Casulties. // Transactions of the North East Coast institution of Engineers and Shipbuilders. – 1060. – Vol. 76. – Part 6. – P. 285.
5. Бабінець В.І., Кобзарук О.В., Смажило Б.В. Підвищення опору фретинг-корозійної втоми пресових з'єднань у морській воді // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2021. – № 57. – С. 68 – 72.
6. Кобзарук А.В., Бабинец В.И. Исследование фреттинг-процессов при циклическом изменении напряженного состояния в пятне контакта // Вісник Одеського національного морського університету: зб. наук. праць. – 2021. – № 2(65). – С. 138 – 151. DOI 10.47049/ 2226-1893-2021-2-138-151.
7. Бабинец В.И., Кобзарук А.В. Ремонт и восстановление судовых гребных валов газопламенным нанесением порошковых покрытий. // Вісник Одеського національного морського університету: зб. наук. праць – 2021. – № 3(66). – С. 49 – 59. DOI 10.47049/ 2226-1893-2021-3-49-59.
8. Карпенко Г.В. Прочность стали в коррозионной среде. – Москва-Киев: «Машгиз», 1963. – 187 с.
9. Похмурський В.І., Хома М.С. Корозійна втома металів і сплавів. – Львів; СПОЛОМ, 2008. – 304 с.
10. Похмурский В.И, Калахан О.С. та ін. Технологія очисно-зміцнювальної підготовки поверхні перед нанесенням захисних покриттів // Цільова комплексна програма НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин»: зб. наук. статей. – К: ІЕЗ ім. Е.О. Патона НАН України, 2006. – С. 115 – 119.

11. Табулевич К, Похмурский В.И., Мелехов Р.К., Круцан Р.К. Повышение коррозионно-механической прочности конструкционных элементов методом ППД // Вопросы механики и физических процессов резания и холодного пластического деформирования: сб. трудов. – К.: Ин-т сверхтвёрдых материалов, 2002. – С. 420 – 426.

12. Балацкий Л.Т., Филимонов Г.Н., Саламашенко А.Г. Некоторые мероприятия по увеличению долговечности судовых гребных валов // Судостроение за рубежом. – 1970. – №42. – С. 26 – 50.

13. Кобзарук А.В. Морская коррозия металлов в напряженном состоянии. – Одесса – Херсон: Гринь Д. С., 2014. – 256 с.

Анотація – Пропонується технологія захисту від корозійно-механічного пошкодження поверхонь судових гребних валів в проміжках між робочими шийками ізоляційною стрічкою, що термоусаджується. Проведені випробування фізико-механічних властивостей захисного матеріалу, його водопоглинання та стійкості до корозійно-біологічного впливу морської води. Корозійно-втомні випробування дослідних зразків з покриттям та без нього здійснено у природній морській воді на базі $50 \cdot 10^6$ циклів. Дослідженнями показана висока надійність захисту неробочих шийок судових гребних валів від корозійно-втомних пошкоджень в морській воді. Технологія захисту опробувана на судноремонтних підприємствах та схвалена класифікаційним товариством.

Annotation – The technology of protection against corrosion-mechanical damage to the surfaces of ship propeller shafts between its working necks with a heat-shrinkable insulating tape is presented. The physical and mechanical properties of the protective material, its water absorption, and resistance to the corrosion and biological effects of sea water were tested. Corrosion-fatigue tests of prototypes in seawater were carried out based on $50 \cdot 10^6$ cycles. Tests have shown the high reliability of protection of non-working journals of marine propeller shafts from corrosion-fatigue damage in seawater. The protection technology was tested at shipyards and approved by classification society.