

УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ МОРСЬКИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ

імені адмірала МАКАРОВА

СЕВРЮКОВ ВОЛОДИМИР ВАСИЛЬОВИЧ

УДК 629.5.083.5

На правах рукопису

**РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ТА УДОСКОНАЛЕННЯ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ
ВІДНОВЛЕННЯ СУДНОВИХ ВАЛІВ**

Спеціальність 05.08.04 - Технологія суднобудування та судноремонту

АВТОРЕФЕРАТ дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата
технічних наук

Миколаїв - 2001

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Одеській державній морській академії Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник	- доктор технічних наук, професор Кравцов Тимофій Григорович, Одеська державна морська академія, декан Маріупольського факультету
-------------------	---

Офіційні опоненти:

- доктор технічних наук, професор Лебедєв Юрій Михайлович, Український державний морський технічний університет Міністерства освіти і науки України, професор кафедри зварювального виробництва
- кандидат технічних наук, доцент Герасимович Леонід Михайлович, Херсонський економіко-правовий інститут Міністерства освіти і науки України, завідувач кафедри менеджменту ЗЕД

Провідна установа: Одеський державний морський університет Міністерства освіти і науки України, м. Одеса

Захист відбудеться **3 липня 2001** р. о 10-й годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 38.060.01 Українського державного морського технічного університету за адресою: 54025, м.Миколаїв, проспект Героїв Сталінграда, 9, ауд. 360.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Українського державного морського технічного університету імені адмірала Макарова за адресою: 54025, м.Миколаїв, проспект Героїв Сталінграда, 9.

Автореферат розісланий " 1 " 06 2001 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради

 В.Ф.Квасницький

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасний стан судноремонтного виробництва України пов'язаний зі старінням флоту. Світова практика показує, що відновлення деталей судових технічних засобів складає великий обсяг судноремонтних технологій. Однією з найбільш важливих задач відновлення судових деталей і пристроїв є підвищення їхньої надійності і довговічності. Суднові гребні вали, балери, штирі рулів належать до категорії відповідальних деталей, що працюють в умовах дії значних знакозмінних навантажень і морської води.

Найбільш розповсюдженим способом відновлення і захисту судових валів від корозії є наплавлення. Аналіз причин руйнування наплавлених валів показує, що поломки носять головним чином втомний характер і є результатом впливу циклічних навантажень і корозійного середовища. Проблему підвищення циклічної міцності наплавлених валів розв'язували багато дослідників на основі аналізу причин, що викликають утворення дефектів, несприятливих структурних змін при напавленні, але роль різних факторів у зниженні опору втомі оцінюється в літературі неоднозначно, а наявні випадки руйнування відновлених валів не дозволяють повною мірою реалізувати можливості енерго- і матеріалозберігаючих технологій у судноремонтному виробництві.

Актуальність теми обумовлена зростаючою потребою відновлення зношених валів різних типів суден.

Зв'язок з науковими програмами, темами. Дисертаційна робота включає результати досліджень, виконаних відповідно до цільової програми розвитку транспортного комплексу України "Транспорт", у рамках науково-дослідних робіт на замовлення судноремонтних підприємств № ГР-01880019153 "Виготовлення устаткування і розробка технології ультразвукової ударної обробки судових деталей і конструкцій", № ГР-01870009865 "Розробка обґрунтувань для внесення в Правила Регістру вимог по напавленню гребних валів", № 1553 від 4.05.2000 р. "Дослідження термодеомаційних процесів при корозійностійкому напавленні судових деталей типу валів та видача рекомендацій по підвищенню опору втомності.

Мета і задачі роботи. Метою роботи є підвищення експлуатаційного ресурсу судових валів шляхом їхнього відновлення і забезпечення циклічної міцності з використанням ультразвукової ударної обробки.

Для досягнення мети необхідно було вирішити наступні задачі:

- вивчити характерні ушкодження судових валів;
- установити причини зниження опору втомі судових валів у залежності від властивостей і структури основного і напавленого металів;
- запропонувати розрахункову методику прогнозування імовірності утворення макро- і мікродефектів при відновленні деталей;
- виконати тонкі дослідження перехідної зони при відновленні судових валів і встановити закономірності сприятливих структурних змін металу;
- визначити розподіл і виявити способи регулювання залишкових напружень у зоні ініціювання втомних тріщин при експлуатаційному навантаженні судових валів;
- розробити технологію відновлення і підвищення циклічної міцності судових валів;
- удосконалити устаткування для ультразвукової ударної обробки (УУО).

Методи дослідження. Теоретичною і методологічною основою дослідження послужили розробки вітчизняних і зарубіжних дослідників в галузі втомності металів, механіки руйнування. Теорії теплових процесів, технології суднобудування і судноремонту. У роботі використане чисельне моделювання основних фізичних явищ у залежності від вихідних умов і режимів напавлення.

Для виявлення причин зниження опору втомі валів після наплавлення використовувалися фрактографічний метод дослідження втомних зламів і мікроструктурний аналіз. Окремі явища вивчалися методом тонких фольг з використанням просвітлювального електронного мікроскопа. Особливості руйнування наплавленого металу і його будова вивчалися методом вугільних реплік.

Залишкові напруження визначали методом зняття шарів при розточенні й обточуванні дисків. Випробування на втому виконані на установках, що працюють за схемою чистого вигину при симетричному циклі навантаження зразка, що обертається.

Наукова новизна

1. Дослідженнями втомних руйнувань зламів встановлено, що при відсутності макродефектів типу шлакових включень і гарячих тріщин причиною зниження опору втомі металу при наплавленні є ослаблені ділянки зони термічного впливу, викликані несприятливими залишковими напруженнями, структурними перетвореннями, а також ділянки зони перемішування відновленого й основного металів.

2. Розроблено і науково обґрунтовано розрахунковий метод прогнозування імовірності утворення в перехідному і відновленому шарах дефектів у вигляді гарячих і холодних мікротріщин, які не можуть виявлятися практичними методами контролю, а також умов сприятливого розподілу мікроструктур і залишкових напружень у зоні потенційного ініціювання втомних тріщин при експлуатаційному навантаженні.

3. Розроблено розрахункову методику комплексного визначення структури, величини деформацій і напружень у будь-якій точці гребного вала в процесі відновлення, що дозволяє за допомогою комп'ютерного моделювання раціонально регулювати розвиток деформаційних процесів і формування напруженого стану з урахуванням мікроструктурних змін у наплавленому й основному металах.

4. Запропоновано спосіб підвищення циклічної міцності відновлюваних суднових валів, що полягає в наплавленні підшару з залишковими напруженнями стиску і наступним нанесенням корозійно-стійкого металу, у якому напруги стиску одержують пластичним деформуванням ультразвуковою ударною обробкою.

5.

Практичне значення отриманих результатів. Наукові результати виконаних досліджень використані при розробці технології відновлення наплавленням суднових валів і способів забезпечення їхньої циклічної міцності за допомогою УУО на судноремонтних заводах "Україна" (м.Одеса), Азовському судноремонтному заводі (м.Маріуполь) при ремонті суден "Донбасс", "Волго-Дон" та ін. Для підвищення ефективності УУО модернізоване технологічне оснащення.

Впровадження технології відновлення суднових валів на судноремонтних підприємствах здійснювалося на основі розробленої технологічної інструкції **ТИ 437-68-00** "Судовые гребные валы. Восстановление и коррозионная защита". Технологія схвалена Регістром судноплавства України.

Економічний ефект від впровадження технології складає 89760 грн на рік. Результати досліджень використовуються в навчальному процесі і включені до навчальних посібників для студентів і курсантів Одеської державної морської академії.

Особистий внесок здобувача. Безпосередньо автором, на основі глибокого аналізу умов роботи суднових валів, розроблено новий підхід до розв'язання проблеми підвищення працездатності наплавлених валів, запропоновано і реалізовано спосіб відновлення, що забезпечує підвищену опірність наплавленого металу втомному руйнуванню, виконано комплексні дослідження з оцінки залишкової напруженості, вивчено закономірності утворення дефектів у наплавленому металі та навколошовній зоні, розроблено технологію відновлення і спосіб корозійно-стійкого захисту суднових валів з використанням спеціального підшару, удосконалено вузли устаткування і технологію обробки валів з використанням ультразвуку.

Апробація роботи. Результати дисертаційної роботи доповідалися й одержали позитивну оцінку на 15-й Щорічній міжнародній технічній конференції в квітні 2000 року в м. Одесі, на науково-практичному семінарі "Судоремонт: реалии и перспективы" в м. Миколаєві, 29.11 - 1.12.2000 р. У цілому робота обговорювалася на науково-технічній раді УДМТУ з технології суднобудування, зварювального виробництва, матеріалознавства і розвитку виробництва, а також на кафедрі "Судноводіння й енергетика суден" Маріупольського факультету ОДМА.

Публікації 3 теми дисертації опубліковано 10 робіт, з них 2 монографії, 6 - у збірниках наукових праць і 2 в збірниках доповідей міжнародної конференції та семінару.

Структура й обсяг дисертації. Дисертація складається з вступу, п'яти глав, загальних висновків по роботі, списку використаних джерел з 192 найменувань, додатка і містить 229 сторінок, з них 146 сторінок основного машинописного тексту, ілюструється 93 малюнками і 27 таблицями.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, визначено мету і завдання роботи, показано методологічні основи досліджень, наукову новизну і практичну значимість роботи.

В першому розділі вивчено характерні uszkodження суднових валів і описано умови їхньої роботи, проаналізовано причини зниження опору втомі відновлених валів.

Судновий валопровід є одним з головних елементів судна. Значна частина суднових валів експлуатується в умовах циклічного навантаження і дії корозійного середовища. При їх експлуатації найбільш часто зустрічаються руйнування, обумовлені корозією в морській воді, фреттинг-корозією, а також втомні тріщини. Вали відновлюються переважно наплавленням із застосуванням електродного дроту або стрічки. їх працездатність визначається опірністю наплавленого металу втомному руйнуванню.

З літературних даних встановлено, що при наплавленні гребних валів опір втомі залежить від багатьох факторів: властивостей наплавленого металу, дефектів зварювання, залишкових напружень, властивостей зони термічного впливу, способу і режимів наплавлення. При наплавленні хромонікелевих сталей на сталі перлітного класу основною причиною зниження опору втомі є гарячі тріщини, що утворюються переважно в зоні перемішування наплавленого й основного металів, а також знеміцнений феритний прошарок, карбідна гряда біля границі сплавлення і розташовані по границях аустенітних зерен карбідні виділення, які знеміцнюють наплавлений метал.

Роль різних факторів у літературі оцінюється неоднозначно. Для встановлення їх впливу необхідні тонкі дослідження будови металу в зоні наплавлення і вивчення термомеханічних процесів.

Для підвищення опору втомі наплавлених валів застосовують різні способи пластичного деформування поверхневого шару і створення в ньому напружень стиску. Вибір конкретного способу обробки суднових валів визначається їх матеріалами, габаритами й іншими умовами.

На основі матеріалів розділу визначено задачі експериментальних досліджень, моделювання термодеомаційних процесів, розрахунків структурних змін, технологічних розробок і удосконалення устаткування.

У другому розділі наведено дані про властивості досліджуваних матеріалів, викладено методику і приклади чисельного дослідження термомеханічних процесів при наплавленні деталей типу валів; описано методику визначення залишкових напружень у наплавлених валах, а також методики електронно-мікроскопічних, фрактографічних і фізичних

досліджень, що дозволили виявити закономірності зародження і поширення втомних тріщин в основному і наплавленому металах.

Дослідження циклічної міцності проводилися на зразках діаметром 70 мм зі сталі 35, з якої виготовляється більшість судових валів.

Для вивчення найбільш несприятливих зон утворення дефектів у наплавлених валах і встановлення причин зниження опору втомі використовувалися втомні злами випробуваних до руйнування зразків із застосуванням фрактографічного методу досліджень за допомогою вугільних реплік, а для більш глибокого вивчення окремих явищ використовувався метод тонких фольг.

Залишкові напруження визначалися на дисках товщиною 20 мм, вирізаних з наплавлених зразків, а замірювання деформацій (напружень) проводилося методом розточування й обточування дисків.

Випробування проводилися на втомних машинах, що працюють за схемою чистого вигину при симетричному циклі навантаженні зразка, що обертається. База випробувань 10^7 циклів. Для оцінки ефективності зміцнення наплавлених зразків застосовувався багатобійковий ударний інструмент, що працює від генератора потужністю 1,2 кВт з частотою 27 кГц.

Розподіл залишкових напружень, характер мікроструктури, властивості зони перемішування і зони термічного впливу, ризик утворення гарячих (холодних) тріщин для конкретних режимів і умов наплавлення валів досліджували чисельними методами за допомогою комп'ютерних засобів.

В третьому розділі на основі прийнятих критеріїв утворення в наплавленому металі і зоні термічного впливу гарячих (холодних) тріщин і несприятливих структурних змін наведено результати чисельного дослідження термомеханічних процесів при наплавленні судових валів хромонікелевими електродними матеріалами, оцінено вплив термічного циклу на процес утворення дефектів, несприятливих структурних змін у зоні термічного впливу, показано шляхи регулювання залишкових напружень при наплавленні валів по гвинтовій траєкторії малого кроку.

Як критерій ризику утворення гарячих тріщин у зоні проплавлення запропоновано використовувати критерій, що оцінює схильність металу зони проплавлення до зазначених тріщин на основі середнього хімічного складу зони проплавлення в сполученні з відповідними діаграмами WRC-1992 (індекс W_{WRC}) або Шеффлера з нанесеними зонами складів, схильних до утворення гарячих тріщин, деформаційний критерій для складів, схильних до утворення гарячих тріщин, що оцінює ризик появи таких дефектів для альтернативних технологічних варіантів.

Як критерії ризику утворення холодних тріщин у наплавленому шарі та в зоні термічного впливу (ЗТВ) основного металу запропоновано використовувати два відомих положення: холодні тріщини відсутні, якщо в сталі не утворюється мартенсит і якщо в зоні їх потенційного утворення діють залишкові стискувальні напруження.

Як критерій оцінки ризику утворення гарячих тріщин у наплавленому хромонікелевому металі прийнято відношення еквівалентів хрому і нікелю

$$a_w = Cr_{екв} / Ni_{екв} ,$$

де $Cr_{екв} = Cr + Mo + 0,7Nb$; $Ni_{екв} = Ni + 35C + 20N + 0,2Cu$

Це співвідношення повинне бути в межах $1,47 < a_w < 2,0$.

Холодні тріщини утворюються при несприятливому сполученні трьох основних факторів: наявності мартенситної структури, високих напружень, що розтягують, і дифузійного водню. Тому як критерій відсутності холодних тріщин у зоні термічного впливу і зоні перемішування (перехідній зоні) прийнято умову, що в будь-якій точці наплавленого металу вміст мартенситу незначний, а нормальні залишкові напруження у відповідному напрямку менші (рівні) нулю, тобто

$$V_m = 0 \quad \text{або} \quad \sigma_{ii} \leq 0,$$

де V_m – вміст мартенситу; σ_{ii} – рівень залишкових напружень.

Сприятливим слід вважати мікроструктурний стан у зоні потенційного утворення гарячих тріщин, якщо відсутні інтерметалідні включення типу о-фази, а також карбідні утворення, керувати якими можна вмістом вуглецю і тривалістю перебування металу при відповідних температурах..

Для оцінки ступеня сприятливості обраних режимів і умов наплавлення корозійностійкого покриття на вали виконано розрахунки:

- температурних полів у виробі, що підлягає наплавленню, включаючи розміри зони проплавлення;
- хімічного складу зони проплавлення на всьому протязі процесу;
- мікроструктурних змін у зоні проплавлення і ЗТВ основного металу і попереднього шару;
- величини нагромаджених активних пластичних деформацій розтягування при остиганні металу в температурному інтервалі крихкості (ТІК);
- величини напруг, близьких до залишкових у зонах потенційного утворення холодних тріщин.

При чисельному моделюванні температурних полів використовували відому методику теорії теплопровідності. За температурою в кожній точці наплавленого виробу визначалися відповідні розміри зони проплавлення металу.

За відомим хімічним складом кожної зони визначався середній хімічний склад зони проплавлення в перетині наплавленого валика.

Розрахунок температурних полів проводився з урахуванням зміни теплофізичних властивостей матеріалу в різних зонах, що, крім температури, залежать від хімічного складу і макроструктурного стану.

Для визначення структурних складових після повного охолодження розплавленого металу використовувалися діаграми Шеффлера-Делонга. З цих діаграм використовувалися характерні зони хімічного складу для однофазного (100 % Φ , 100 % А, 100 % М) двофазного (А+ Φ ; А+М; М+ Φ) і трифазного (А+ Φ +М) станів, для яких побудовані нерівності, що визначають кількісні границі вмісту відповідних фаз. Для виявлення різних станів з відповідними номерами рекомендовані діаграми сталей, близьких за складом сталям: 35, 38ХНЗМФА, 40ХН2МФА.

При розрахунку напружень (деформацій) використовувався метод послідовного простежування розвитку пружнопластичних деформацій при нагріванні й охолодженні наплавленого вала. Для певних варіантів наплавлення моделей валів розрахункові результати розподілу залишкових напружень σ_{ii} і $\sigma_{\varphi\varphi}$ зіставлялися з експериментальними вимірами, отриманими методом Закса, тобто шляхом розточення-обточування дисків,

вирізаних (поперечними різаними) з наплавлених зразків. Оскільки вирізання дисків зв'язане з істотною релаксацією напружень σ_{zz} і частковою релаксацією σ_{rr} і $\sigma_{\theta\theta}$, то операція вирізання диска також моделювалася чисельно шляхом продовження процесу простежування залишкового стану після наплавлення ділянки вала по довжині, рівній товщині дисків, що вирізуються, при відповідних граничних умовах.

Проведені результати випробувань на втому показали, що навіть при відсутності дефектів у зоні зародження втомної тріщини межа витривалості після наплавлення знижується на 40% порівняно з основним металом. З використанням чисельного методу дослідження термомеханічних процесів встановлено, що в зоні наплавлення першого шару критерій $\mathfrak{a}_{wrc} < 1,4$ (див. таблицю), що створює сприятливі умови для утворення гарячих тріщин. При наплавленні сталі типу 09X13H4M2Г2С показник $\mathfrak{a}_{wrc}$ зростає, що знижує

ризик утворення гарячих тріщин. Наплавлення валів $\varnothing 300$ мм електродним дротом Св-08Х20Н9С2БТЮ по підшару зі сталі 09Х13Н4М2М2С підвищує критерій $\mathfrak{a}_{wrc}$ що, гарантовано забезпечує відсутність гарячих тріщин в аустенітному металі першого шару наплавлення.

Важливим показником для комплексного визначення впливу підшару на ризик утворення гарячих тріщин є кінетика деформацій у ТІК. Найбільш істотно це виявляється при наплавленні валів великих діаметрів (300 мм).

Характеристика $\mathfrak{a}_{wrc}$ для різних варіантів наплавлення

$\varnothing$ вала, мм	Номер варіанту	Тип наплавленого металу	Номер шару	Критерій $\mathfrak{a}_{wrc}$ наплавлення		
				Початок	Середина	Кінець
72	I	08Х20Н9С2БТЮ	I	1,26	1,02	1,28
			II	1,54	1,40	1,48
			III	1,63	1,56	1,59
72	II	09Х13Н4М2Г2С	I	1,68	1,55	1,42
300	III	08Х20Н9С2БТЮ	I	1,34	1,19	1,10
300	IV	09Х13Н4М2Г2С	I	-	-	-
		08Х20Н9С2БТЮ	II	1,67	1,67	1,61

Наявність підшару знижує піки активних пластичних деформацій розтягування в ТІК (рис.1) при наплавленні аустенітної сталі.

Ця особливість пов'язана з тим, що в наплавленому підшарі діють

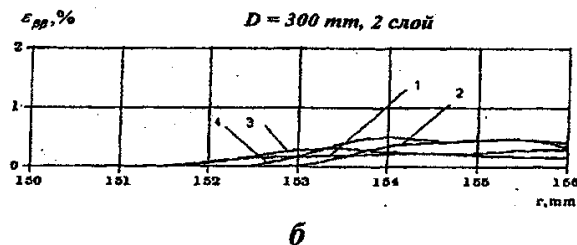
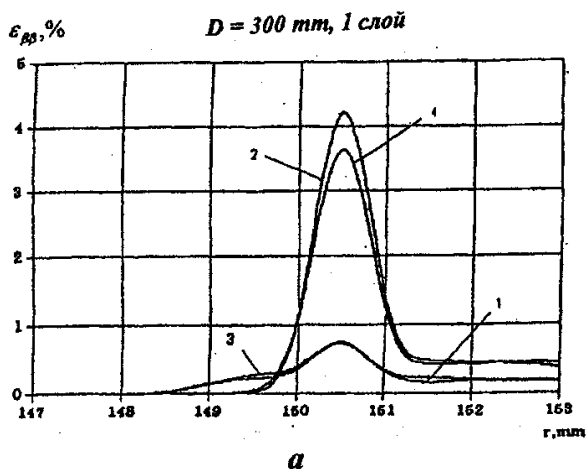


Рис. 1. Розподіл пластичних деформацій ϵ_{pp} при наплавленні електродним дротом Св-08Х20Н9С2БТЮ без підшарку (а) з підшарком 09Х13Н4М2Г2С (б) 1, 3 – середини перетину першого валика та валика на половині довжини наплавлення; 2, 4 – перетини тих же валиків в місцях перекриття сусідніми

(сталь 09Х13Н4М2Г2С) з позицій ризику утворення холодних тріщин на основі критерію $V_m = 0$ або $\sigma_{ij} \leq 0$. Проблема холодних тріщин розглядалася не тільки для ЗТВ, а й для проміжного підшару. Розрахунковим шляхом визначалися масові частки V_{ij} мікроструктур (фериту, аустеніту, мартенситу).

З огляду на підвищену чутливість хромистих сталей типу 09Х13Н4М2С до термічного циклу охолодження, змінити схильність цього матеріалу до утворення холодних тріщин можна за рахунок регулювання хімічного складу зони перемішування першого шару з основним металом. Однак, як показали розрахунки, більш ефективним є регулювання напруженого стану, з забезпеченням його сталості по всій довжині наплавлення. На практиці це досягається застосуванням попереднього підігріву до температур $\sim 300^\circ\text{C}$ (для

стискуючі напруження σ_{pp} . При наплавленні на підшар аустенітного металу при прогріванні підшару відбувається релаксація цих напружень з переходом пружних деформацій у пластичні, що супроводжується стиском нижчого підшару.

Отримані результати дозволяють стверджувати, що застосування вище вказаного підшару, сприяє зниженню ризику утворення гарячих тріщин у першому шарі наплавленого аустенітного металу.

Порівнювалися варіанти наплавлення хромонікелевої сталі без підшару і з підшаром

сталі 35). Таке нагрівання не змінює кардинально мікроструктуру наплавленого металу, але поліпшує напружений стан, що в багатьох випадках є достатнім для запобігання холодним тріщинам. Зі сказаного випливає, що при наплавленні проміжних або захисних шарів з нержавіючих сталей як аустенітного, так і мартенситного класів, питання регулювання залишкових напружень є досить важливими з позицій зниження ризику утворення холодних тріщин як у ЗТВ, так і в наплавленому шарі.

Розглядалася можливість регулювання залишкових напружень за рахунок попереднього підігріву й енергетичних параметрів режиму наплавлення. Використовувався розрахунковий метод оцінки залишкових напружень, а для порівняння були виконані окремі експериментальні виміри за методикою "розточення-обточування" дисків, вирізаних з валів, наплавлених електродним дротом Св-08Х20Н9С2БТЮ (рис.2,а) і сплавом 9Х13Н4М2Г2С (рис.2,б). З рис.2 видно досить добре узгодження експериментальних даних з розрахунком.

Встановлено, що попередній підігрів при наплавленні валів мартенситною сталлю є досить ефективним засобом підвищення опірності наплавленого металу утворенню холодних тріщин як у зоні проплавлення, так і ЗТВ. Однак при цьому виникає ризик появи гарячих тріщин у першому наплавленому шарі, запобігти яким можна зміною параметрів режиму з метою зниження частки участі основного металу в наплавленому. Режими наплавлення впливають на структурні перетворення в навколошовній зоні і першому наплавленому шарі. Однак можливості регулювання залишкових напружень за рахунок відповідного енергетичного режиму наплавлення досить обмежені, особливо для валів великих діаметрів.

Математично визначені критерії дозволяють з безлічі можливих технологічних режимів і умов наплавлення вибрати тільки такі, при яких гарантується відсутність гарячих і холодних тріщин, досить сприятливі мікроструктури і залишкові напруження, та в ЗТВ з високим еквівалентом вуглецю, - відсутність холодних тріщин.

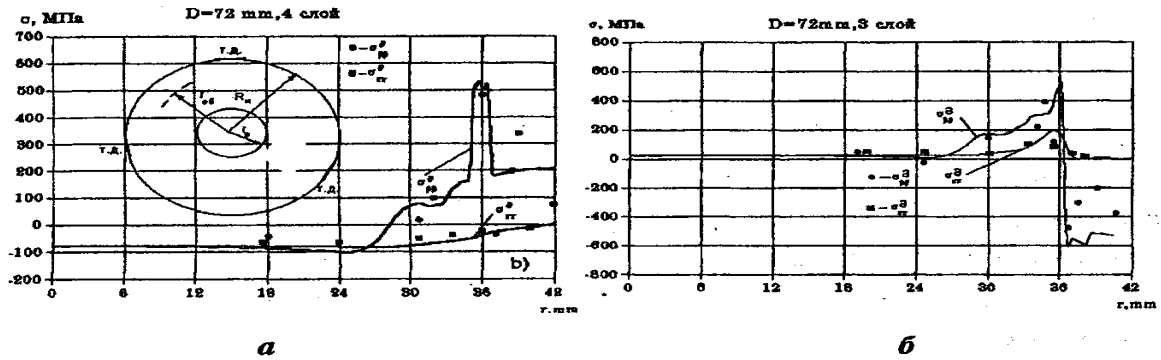


Рис.2. Розподіл залишкових напружень $\sigma_{\theta\theta}^0$, σ_{rr}^0 та співставлення розрахункових і експериментальних даних при наплавленні електродним дротом Св-08Х20Н9С2БТЮ (а) та сплавом 9Х13Н4М2Г2С (б)

В четвертому розділі наведено результати електронно-мікроскопічних і фрактографічних досліджень втомних зламів наплавлених і випробуваних до руйнування зразків, що дозволили виявити найбільш несприятливі зони утворення дефектів і зони зародження втомних тріщин; виявлені можливості керування структурними змінами в перехідній зоні при простому і складному термічних циклах; підтверджено ефективність розробленого чисельного методу прогнозування умов утворення дефектів, які істотно впливають на процес втомного руйнування; запропоновано оптимальний склад наплавленого металу, який забезпечує високу опірність втомному руйнуванню.

Шляхом прямого спостереження, з використанням електронної мікроскопії і фрактографічного аналізу, визначено роль дефектів у втомному руйнуванні наплавлених валів.

Встановлено, що перехідна зона двох різномірних металів є найбільш відповідальною у втомному руйнуванні. При наплавленні хромонікелевих сталей на сталь 35 у ЗТВ біля границі сплавлення утворюється знеуглецьований феритний прошарок, що складається з бездислокаційних зерен фериту. Є ділянки феритних зерен, забруднених виділеннями другої фази, що розташовуються у вигляді ланцюжка уздовж границь зерен. Наявність виділень другої фази негативно позначається на пластичності, ударній в'язкості, опорі втомі.

Характерною рисою мікроструктури аустенітного металу, наплавленого на перлітну сталь, є виділення карбідів по границях аустенітних зерен, у зоні перемішування наплавленого з основним металом. Вони відсутні в поверхневих шарах, що сприяє підвищенню опірності цієї зони втомному руйнуванню.

При великій погонній енергії наплавлення створюються більш сприятливі умови для протікання дифузійних процесів і підвищення щільності карбідів по границях аустенітних зерен. Наявність ослаблених границь з високою щільністю карбідів призводить до крихкого руйнування наплавленого металу. При наплавленні аустенітно-феритної стали на сталь 35 усередині аустенітних зерен зони перемішування утворюються виділення плівкового типу. Розшифровка електронограм дозволила встановити, що виділення плівкового типу являють собою σ -фазу, яка робить наплавлений метал крихким.

Іншою важливою особливістю наплавлення хромонікелевих сталей є утворення карбідної гряди на границі сплавлення. Найбільш розвинена карбідна гряда при наплавленні електродною стрічкою зі сталей 20X13N4Г9 і 04X19N11МЗ. В інших випадках по границі сплавлення утворюється тільки карбідний рядок. Його вплив аналогічний впливу карбідних виділень по границях аустенітних зерен, що розпушують ці границі.

Методом тонких фольг підтверджено існування мартенситного прошарку в перехідному шарі, що не має чіткої границі з боку основного і наплавленого металів. При наплавленні електродними дротами Св-08X19N11Ф2С2, Св-08X20Н9Г7Т, Св-08X20Н9С2БТЮ, Св-04X19Н9Т, Св-09X16Н25М6АФ, Св-06X25Н12ТЮЗ, Св-05X20Н9ФБС,

прошарок має два різновиди: пакетний (рейковий) і крупнокристалічний мартенсит.

Зміна структурного стану мартенситу, яка пов'язана з відпуском при наплавленні наступних шарів чи суміжних валиків, підвищує здатність мартенситу до пластичної деформації, зменшує величину пікових напружень і небезпеку виникнення холодних тріщин. Мікротріщин, пов'язаних з утворенням мартенситної структури, у перехідній зоні не виявлено. Це підтверджує той факт, що мартенсит у перехідному шарі не є джерелом зародження втомної тріщини, проте він впливає на процес втомного руйнування.

Гарячі тріщини утворюються в першому перехідному наплавленому шарі і на ділянках, що піддаються повторному нагріванню. Гарячі тріщини утворюються як у суто аустенітному, так і в аустенітно-феритному металі зі вмістом феритної складової до 20 %, що властиво для наплавлення як під флюсом, так і у вуглекислому газі. Наявність феритної фази підвищує розчинність шкідливих домішок, тому з підвищенням вмісту фериту в наплавленому металі його стійкість до утворення гарячих тріщин підвищується. Про це свідчать порівняльні випробування зразків, наплавлених електродним дротом Св-08X20Н9С2БТЮ, Св-05X20Н9ФБС і Св-08X19Н11Ф2С2, де найбільш високий вміст феритної фази виявлено при наплавленні сплаву 08X20Н9С2БТЮ, а при наплавленні інших сплавів він не перевищує 20 %. Тому наплавлення хромонікелевих сталей на основний метал не може бути рекомендовано через утворення гарячих тріщин у перехідному шарі.

Експериментально визначався оптимальний склад підшару, який забезпечує підвищену опірність перехідної зони втомному руйнуванню. З безлічі випробуваних наплавочних матеріалів, розроблених ІЕЗ ім. Є.О.Патона, найбільш прийнятним виявився склад наплавленого металу типу 07X12НЗМ2Г2С, близький за складом до 09X13Н4Г2С. При наплавленні цього сплаву відсутні феритний прошарок, карбідна гряда, карбідні виділення по границях зерен, немає гарячих тріщин.

Наплавлений метал типу 07X12НЗМ2Г2С є оптимальним з погляду забезпечення високої стійкості проти утворення гарячих тріщин.

Металографічні дослідження показали, що перший наплавлений шар біля границі сплавлення з високою щільністю дрібнодисперсних карбідів і твердістю 600 НV має підвищену опірність зародженню і поширенню втомної тріщини. Поширення втомної тріщини проходить по тілу зерен, що пов'язано з високою міцністю границь зерен. Перший наплавлений шар має високу опірність зародженню втомної тріщини, а поверхневі шари - високу опірність поширенню тріщин. Поєднання позитивних властивостей різних шарів наплавлення, а також високі міцнісні властивості навколошовної зони дозволяють підвищити

опір втомі зразків зі сталі 35 до рівня основного металу. При наплавленні валів, виготовлених зі сталей підвищеної категорії міцності, потрібна оцінка властивостей перехідного шару на предмет утворення гарячих і холодних тріщин.

В п'ятому розділі обґрунтовано технологічну схему відновлення суднових валів. Рекомендовано наплавлення корозійно-стійких сталей вести по високоміцному підшару зі сталі 07X12H3M2Г2С, що являють собою двофазний феритомартенситний сплав з невеликим вмістом (до 10%) аустеніту. Для гарантованого одержання наплавленого металу без гарячих тріщин поверх високоміцного підшару рекомендовано виконувати наплавлення електродним дротом Св-08Х20Н9С2БТЮ, а потім електродним дротом суто аустенітного класу з малим вмістом вуглецю і підвищеною корозійною стійкістю, зокрема

СВ-04Х19Н1М3, СВ-07Х25Н13 та ін.

Термообробка - найбільш поширений процес, що сприяє частковій релаксації залишкових напружень, викликаних наплавленням. Високий відпуск доцільно робити при малій тривалості, щоб зменшити несприятливий вплив високого нагрівання на мікроструктурний стан у перехідній зоні. Експериментально встановлено, що відпуск при зазначених умовах не дозволяє кардинально знизити залишкові напруження в аустенітному наплавленні. Тому в роботі вивчено процеси впливу різних видів пластичного деформування поверхневих шарів на їх напружено-деформований стан і циклічну міцність.

З механічних обробок найбільш відомі обкатування роликами, обробка вибухом, ультразвукова ударна обробка (УУО) та ін. Виконано дослідження впливу способу обробки на залишкові напруження в зразках зі сталі 35, наплавлених електродним дротом Св-08Х20Н9С2БТЮ і сталлю 07Х12Н3М2Г2С, Встановлено, що УУО перерозподіляє залишкові напруження

у відносно тонкому поверхневому шарі, де має місце наклепування, і створюються пластичні деформації укорочення в радіальному напрямку і стискаючі напруження в тангенціальному. Розподіл тангенціальних напружень до і після УУО за результатами експерименту на моделях валів показано на рис.3.

Для підвищення циклічної міцності наплавлених валів

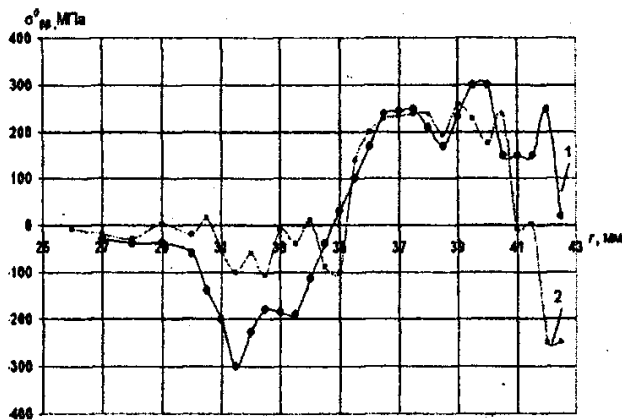


Рис. 3. Розподіл тангенціальних залишкових напружень у поверхневих шарах моделей валів до (1) та після (2) УУО

удосконалено спосіб УУО. Спосіб має значні технологічні переваги в порівнянні з термообробкою, обкатуванням роликом, вибуховою обробкою, іншими способами силового впливу. У зв'язку з тим, що дотепер не розкриті цілком потенційні можливості цього способу, вперше зроблено спробу узагальнити нагромаджений досвід і виявити резерви підвищення ефективності УУО.

Для підвищення ефективності зміцнення необхідні потужні УЗ магнітострикційні перетворювачі, що забезпечують тривалу роботу і високий коефіцієнт передачі енергії УЗ коливань. Для цієї мети замість залізокобальтового сплаву **49Д02Ф** застосовано сплав системи **Fe-Al**, що має вдале сполучення електромагнітних і магнітострикційних властивостей. Такий перетворювач має малий рівень механічних і електричних втрат, дозволяє збільшити амплітуду до **100** мкм, має широкі енергетичні показники. Удосконалено конструкцію акустичного вузла і технологію виготовлення перетворювача, що дозволило підвищити технічні можливості коливальної системи за рахунок зниження втрат на вихрові струми. Створено коливальну систему з плавноперебудовуваною резонансною частотою.

Для поліпшення працездатності пластин сплаву на основі **Fe-Al** використовувалася технологія їх термічного оксидування в кисневмісній солі. Експериментально встановлено, що оксидна плівка є достатнім захистом для забезпечення надійної і тривалої роботи.

На підставі виконаних досліджень розроблено практичні рекомендації з проектування технологічних процесів відновлення і корозійного захисту судових валів із застосуванням УУО для забезпечення їх циклічної міцності, виготовлено дослідно-промислову установку. Розроблено технологію відновлення судових валів і технологічну інструкцію **ТИ 437-68-00** "Судовые гребные валы. Восстановление и коррозионная защита". Здійснено наплавлення та УУО судових валів, що передані на судна і перебувають у підконтрольній експлуатації.

Рекомендації з проектування технології корозійно-стійкого наплавлення передано ряду судноремонтних підприємств для практичного використання.

Річний економічний ефект від впровадження технології складає **89760** грн на рік.

ВИСНОВКИ

1. Суднові вали працюють в умовах дії змінних крутних і згинаючих моментів, подовжньої і поперечних сил, морської води і фретингу. У найбільш несприятливих умовах працюють гребні вали.

2. Характерними ушкодженнями судових валів є корозійні руйнування поверхні, втомні тріщини, знос шийок вала, зминання й ушкодження поблизу шпонкового паза і його носового кінця, під носовим кінцем маточини гребного гвинта і під кінцями облицювань, між маточиною гвинта і кормовим кінцем облицювання, під кормовим облицюванням, а також фретинг-корозія.

3. Ефективним способом відновлення зношених судових валів є їх наплавлення, за умови забезпечення циклічної міцності наплавлених валів.

4. Дослідженнями встановлено, що опір втомі при напавленні визначають структура металу в ЗТВ і зоні перемішування напавленого металу з основним, карбідна гряда і карбідні виділення по границях аустенітних зерен. Збільшення теплової потужності зварювальної дуги, частки участі основного металу в напавленому, виділення карбідів по границях зерен знижують опір втомі. При вмісті в напавленому металі понад 15% δ -фериту циклічна міцність знижується внаслідок утворення α -фази.

5. Дослідження розподілу залишкових напружень показали, що їх регулювання у зоні напавлення і створення в зоні ініціювання втомних тріщин стискаючих напружень є ефективним засобом зниження ризику утворення зварювальних дефектів і підвищення опору втомі. У цьому плані ефективне напавлення на основний метал (сталь 35) двофазного феритомартенситного сплаву **07X12H3M2Г2С**.

6. У роботі показано, що на основі сучасних підходів до математичного опису термодеоформаційних процесів при напавленні по гвинтовій траєкторії, комп'ютерними

засобами можна вірогідно прогнозувати розміри і форму зони проплавлення, хімічний склад і мікроструктуру цієї зони, оцінити ризик утворення гарячих тріщин, розрахувати мікроструктуру в зоні термічного впливу і відповідно кінетику розвитку напружень (деформацій) аж до залишкового стану, оцінювати ризик утворення холодних тріщин і в такий спосіб вести пошук найбільш сприятливих варіантів для забезпечення високого опору втомі.

7. Виконані в роботі чисельні дослідження показали, що при дуговому наплавленні суднових валів без попереднього підігріву аустенітно-феритним електродним дротом

Св-08Х20Н9С2БТЮ досить сприятливі умови з погляду забезпечення підвищеного опору втомі, можна одержати, використовуючи підшар зі сталі 09Х13Н4М2Г2С. При цьому зменшується ризик утворення гарячих тріщин, а в зоні нагромадження втомних ушкоджень створюється сприятливий розподіл залишкових напружень.

8. Розв'язання проблеми підвищення працездатності наплавлених валів методом електродугового наплавлення може бути досягнуто застосуванням високоміцного підшару з феритомартенситного сплаву типу 07Х12НЗМ2Г2С з наступним поверхневим наплавленням тонкого (2-3 мм) корозійностійкого шару та його зміцненні шляхом УУО.

9. Високу ефективність і технологічність має спосіб УУО, що дозволяє при малому зусиллі (70-80 Н) і невеликих енерговитратах (0,8-1,0 квт) деформувати аустенітний метал на глибину близько 3 мм, забезпечуючи при цьому на поверхні наплавленого шару напруження стиску. Удосконалено устаткування і технологічне оснащення для УУО.

ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Олейник Н.В., Севрюков В.В., Стальниченко О.И. Конструкционная прочность и восстановление деталей. - Одесса: ОГМУ, 2000. - 191 с.

2. Кравцов Т.Г., Севрюков В.В. Ультразвуковая обработка судовых деталей и сварных конструкций. - Николаев: УГМТУ, 2001. - 152 с.

3. Кравцов Т.Г., Стальниченко О.И., Севрюков В.В. Основные направления и перспективы использования ультразвука при строительстве и ремонте судов // Вестник ОГМУ. - 1999. - № 3. - С.156-164.

4. Кравцов Т.Г., Севрюков В.В. Инженерный метод оценки остаточных напряжений в валах, наплавленных перлитными и аустенитными сталями // Автоматизация судовых технических средств: Науч.-техн. сборник ОГМА. -Одесса, 1999. - Вып.4. - С.71-77.

5. Севрюков В.В. Усовершенствование колебательных систем магнитострикционных преобразователей ультразвуковой ударной обработки судовых деталей и сварных конструкций // Судовые энергетические установки: Науч.-техн. сборник ОГМА. - Одесса, 2000. - № 4. -С.119-126.

6. Севрюков В.В. Перспективы различных методов упрочнения судовых деталей, восстановленных электродуговой наплавкой и работающих в условиях циклического нагружения // 36. наук, праць УДМТУ. - Миколаїв: УДМТУ, 2000.-№ 1 (367).-С.112-123.

7. Численное исследование термомеханических процессов при наплавке валов судовых механизмов и устройств / В.И.Махненко, Е.А.Великоиваненко, Т.Г.Кравцов, В.В.Севрюков // Автоматическая сварка. - 2001. - № 1. - С.3-10.

8. Кравцов Т.Г., Севрюков В.В., Квасницкий В.В. Восстановление судовых валов наплавкой и повышение их усталостной прочности // 36. наук, праць УДМТУ. - Миколаїв: УДМТУ, 2001. - № 2 (368). - С.122-131.

9. Кравцов Т.Г., Севрюков В.В. Упрочнение наплавленных валов ультразвуковой ударной обработкой // Сб. докл. 15-й Ежегод. междунар. техн. конф. "Прогрессивные технологии в машиностроении", апрель 2000 г. - Одесса; Киев; АГМ Украины, 2000. - С. 106-108.

10.Ю.Кравцов Т.Г., Севрюков В.В., Квасницкий В.В. Технология и оборудование ультразвукового упрочнения судовых деталей с целью повышения их работоспособности //

Сб. докл. участ. семинара "Судоремонт: реалии и перспективы". - Николаев: ДП ТТЦ, 2001. - С.84-93.

Особистий внесок здобувача в роботах, опублікованих у співавторстві

В [1] проведено пошук оптимальних технологічних варіантів відновлення суднових валів з використанням УУО. В [2,3,9] визначено основні шляхи підвищення несучої спроможності відновлених наплавлених валів, розроблено технологію і вдосконалено обладнання для УУО. В [4] підтверджено можливість використання розрахункових залежностей оцінки залишкових напружень з різними фізико-механічними властивостями наплавленого й основного металів. У [7] запропоновано критерії, що дають змогу розрахунковим шляхом визначити можливість утворення і прогнозування при відновленні суднових валів зварювальних дефектів, виконано аналіз розрахунків. У [8,10] обґрунтовано необхідність використання для відновлення валів високоміцного підшару з наступним зміцнюванням поверхневого корозійно-стійкого шару ультразвуковою деформаційною обробкою, технологію відновлення суднових валів і забезпечення їх працездатності.

АНОТАЦІЯ

Севрюков В.В. Розробка технології та удосконалення обладнання для відновлення суднових валів.

Рукопис. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю: 05.08.04 - Технологія суднобудування та судноремонту. Український державний морський технічний університет імені адмірала Макарова. Миколаїв, 2001.

Метою дисертаційної роботи є підвищення експлуатаційного ресурсу суднових валів шляхом їхнього відновлення і забезпечення циклічної міцності з використанням ультразвукової ударної обробки.

Зроблено огляд літературних даних з проблеми втоми наплавлених валів, вивчено особливості втомного руйнування, розроблено науково обґрунтовану методику прогнозування імовірності утворення тріщин в перехідному шарі і зоні термічного впливу, запропоновано методику регулювання мікроструктурних змін і залишкових напружень у зоні потенційного зародження тріщин. Розроблено технологію відновлення суднових валів шляхом їх наплавлення і наступної ультразвукової ударної обробки поверхневих шарів, що забезпечує їхню працездатність в умовах циклічного навантаження в морській воді.

Ключові слова: *наплавлення, суднові вали, циклічна міцність, гарячі і холодні тріщини, залишкові напруження, мікроструктури, ультразвукове зміцнення, устаткування, технологія.*

АННОТАЦИЯ

Севрюков В.В. Разработка технологии и совершенствование оборудования для восстановления судовых валов.

Рукопись. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.08.04 - Технология судостроения и судоремонта. Украинский государственный морской технический университет имени адмирала Макарова. Николаев, 2001.

Целью диссертационной работы является повышение эксплуатационного ресурса судовых валов путем их восстановления и обеспечения циклической прочности с использованием ультразвуковой ударной обработки.

Установлено, что при наплавке гребных валов сопротивление усталости зависит от свойств наплавленного металла, дефектов наплавки, распределения остаточных напряжений, структуры и свойств ЗТВ, способа и режимов наплавки. Основной причиной снижения сопротивления усталости при наплавке хромоникелевых коррозионно-стойких сталей на валы из сталей перлитного класса являются горячие и холодные трещины, ферритная

прослойка в зоне сплавления и карбидная гряда, выделения карбидов по границам зерен, а также большие растягивающие остаточные напряжения в поверхностных слоях наплавленного металла.

На основе принятых критериев образования в наплавленном металле и ЗТВ горячих и холодных трещин разработан расчетный метод определения характера изменения температуры в любой точке наплавляемого вала, геометрии проплавления, химического состава наплавленного металла и изменения структуры металла наплавки и ЗТВ, а также изменение деформаций и напряжений в процессе наплавки. С использованием расчетного метода компьютерным моделированием установлены наиболее приемлемые наплавочные материалы и условия наплавки, исключая образование дефектов, снижающих сопротивление усталости. Выполнены испытания на усталость опытных образцов из стали 35, наплавленных коррозионно-стойким хромоникелевым металлом. Фрактографическим изучением изломов, металлографическими исследованиями структуры образцов с помощью оптической и электронной микроскопии, а также экспериментальным и расчетным анализом распределения остаточных напряжений установлены составы присадочных металлов и последовательность наплавки, обеспечивающие высокие показатели по сопротивлению наплавленных образцов воздействию циклических нагрузок.

По результатам этих исследований установлено, что наиболее высокая работоспособность восстановленных наплавкой валов обеспечивается при наплавке аустенитными хромоникелевыми наплавочными материалами по подслою с мартенситоферритной структурой, в котором возникают напряжения сжатия. Наличие подслоя снижает склонность металла наплавки к образованию горячих трещин при наложении последующих слоев.

Обоснована и разработана технология восстановления наплавкой коррозионно-стойкими сталями гребных валов с высокими показателями предела усталости.

Изучено влияние различных видов пластического деформирования поверхностных слоев на их напряженное состояние и циклическую прочность. Установлено, что наиболее технологичным способом поверхностного упрочнения восстановленных наплавкой валов является ультразвуковая ударная обработка (УУО). Установлено, что УУО перераспределяет остаточные напряжения в относительно тонком поверхностном слое, где имеет место наклеп, происходят пластические деформации укорочения в радиальном направлении и создаются сжимающие напряжения в тангенциальном.

Разработана технология УУО. Усовершенствовано оборудование и технологическая оснастка для УУО.

На основе результатов исследований разработаны практические рекомендации по проектированию технологических процессов восстановления и коррозионной защиты судовых валов с УУО. Изготовлена опытно-промышленная установка для восстановления и упрочнения судовых валов.

Ключевые слова: наплавка; судовые валы; циклическая прочность; горячие и холодные трещины; остаточные напряжения; микроструктуры; ультразвуковое упрочнение; оборудование; технология.

SUMMARY

Sevryukov V.V. Development of technology and improvement of the equipment for restoration of ship shafts. - Manuscript.

The dissertation on competition for scientific degree of Cand.Tech.Sci. on speciality 05.08.04 - Technology of shipbuilding and ship repair. Admiral Makarov Ukrainian state maritime technical university. Nikolaev, 2001.

The purpose of dissertational work is increasing of an operational resource of ship shafts by their restoration and maintenance of cyclic durability with use of ultrasonic shock processing. The review of the literary data on a problem of weariness of directing shafts is made, features of fatigue failure are investigated, scientifically proved technique of forecasting of probability of formation in

a transitive layer and a zone of thermal influence of cracks is developed, the technique of regulation of microstructural changes and residual pressure in a zone of potential origin fatigue cracks is offered. The technology of restoration of ship shaft is developed by surfacing them and the subsequent ultrasonic shock processing of superficial layers which provides their serviceability in conditions of cyclic loading in sea water.

Key words: surfacing; ship shafts; endurance strength; hot and cold cracks; internal stress; microstructures; ultrasonic processing; equipment; technology.