

УДК 621.791

**ЕКСПЕРТИЗА ВТОМНОГО ПОШКОДЖЕННЯ  
ГРЕБНОГО ВАЛА МОРСЬКОГО СУДНА***О. І. БАЛИЦЬКИЙ<sup>1</sup>, М. КАВ'ЯК<sup>2</sup>, П. КАВ'ЯК<sup>2</sup>*<sup>1</sup> *Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;*<sup>2</sup> *Західнопоморський технологічний університет, Щецін, Польща*

Проаналізовано причини та характер експлуатаційного руйнування гребного вала морського судна, виготовленого з низьколегованої сталі. Встановлено, що причиною руйнування є корозійна втома металу, хоча механічні характеристики сталі на повітрі задовільні, а тривала експлуатація вала може бути забезпечена завдяки захисту його матеріалу від морської води.

**Ключові слова:** *гребний вал, втома, корозія, гальванопара.*

Гребний вал судна працює в складних умовах. Він навантажений крутним моментом від проміжного валопроводу з гвинта до головного двигуна судна. Цей момент під час плавання, навіть за доброї погоди, циклічно змінюється внаслідок виконання різних маневрів, а під час шторму динамічне навантаження гребного вала різко зростає. Крім того, поява гвинта над поверхнею води призводить до значних змін обертової швидкості вала, в результаті чого виникають змінні напруження скручування та згину [1–3]. Треба враховувати також обертовий згин вала, зумовлений власною вагою. З іншого боку, гребний вал знаходиться в морській воді, тому одночасна дія корозійного чинника і циклічних напружень є причиною багатьох аварій.

Нижче проаналізовано корозійно-втомне руйнування гребного вала морського судна Lady Elena в області завальцювання.

**Особливості конструкції гребного вала.** Гребний вал (рис. 1) виконано зі сталі SF 60 з таким хімічним складом (mass.%): C – 0,43; Si – 0,18; Mn – 0,69; P – 0,023; S – 0,007 [2]. Вона характеризується високими механічними властивостями включно з опором втомі ( $\sigma_T = 580$  МПа,  $\sigma_B = 820$  МПа,  $\delta = 19\%$ ,  $\psi = 53\%$ ,  $\sigma_{-1} = 274$  МПа, НВ = 167), проте чутлива до корозії у морській воді. Для захисту матеріалу вала від морської води його опресовують бронзовою втулкою з матеріалу BC2 + 0,5Ni (рис. 1a) з належними ливарними властивостями і високими механічними показниками, включно зі зносо- та корозійною тривкістю в морській воді. Втулка складається з чотирьох частин через значну довжину (3360 mm). Їх зварювання спричиняє появу напружень у ній, які з часом можуть стати причиною виникнення тріщин. Після кількох років експлуатації судна в зварних з'єднаннях втулки з'явилися тріщини, тому її замінили на нову, яка теж складалася з чотирьох частин, але з'єднаних механічно та ущільнених кільцями (рис. 1b, поз. 3), що виконані з полімерного матеріалу Thortex, в основі якого є епоксидна смола. На гребному валі можна розрізнити три характеристичні перетини А–А, В–В і С–С в ущільненому з'єднанні частин втулки (рис. 1). Через кілька років після заміни звареної втулки на механічно з'єднану гребний вал зламався.

**Обговорення результатів експертизи.** Втомні злами гребних валів виникають, в основному, поблизу переходу від циліндричної до конічної частини, який

*Контактна особа:* О. І. БАЛИЦЬКИЙ, e-mail: balitski@ipm.lviv.ua

служить для посадки гвинта на вальцьовану частину вала [1], там де змінюється його переріз і, відповідно, концентруються напруження. Досліджуваний вал зруйнувався під ущільненням захисної втулки, через втрату її функціональних властивостей. Зазначимо, що у полімерах на епоксидній основі під час їх тверднення виникають розтягувальні напруження і тому таке кільце втрачає на поверхні герметичність [4]. З врахуванням недостатньої адгезії з'єднаних матеріалів таке розщільнення могло виникнути навіть одразу після його встановлення. Крім того, необхідно врахувати, що різномірні матеріали з'єднання (рис. 1b) мають різні коефіцієнти лінійного розширення [2]. Ущільнювальні кільця монтують після посадки втулки на вал і охолодження до температури біля 20°C, а температура морської води може бути істотно нижча, що призводить до появи напружень, які відривають ці кільця від поверхні втулки, розгерметизовуючи з'єднання. Крім того, відбуваються малі зсуви з'єднаних елементів через експлуатаційні напруження, що закручують і згинають гребний вал.

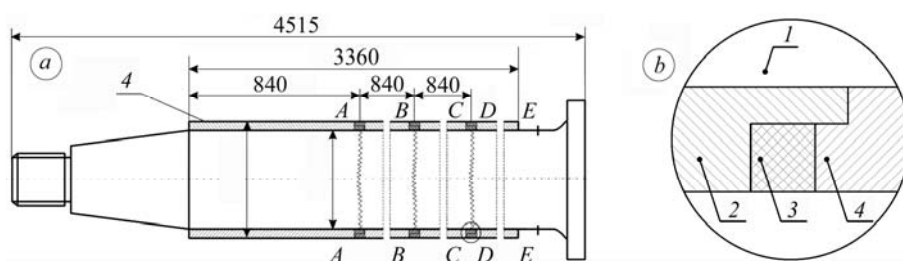


Рис. 1. Схема і основні розміри вала (a) та його переріз (b) в місці з'єднання частин захисної втулки: 1 – вал; 2 і 4 – втулки; 3 – ущільнювальне кільце.

Fig. 1. Scheme of a shaft and its main dimensions (a) and cross-section (b) in the place of connection of a protective bush: 1 – shaft; 2 і 4 – bushes; 3 – joint ring.

Втомне руйнування гребного вала починається в трьох перерізах А–А, В–В і С–С (рис. 1), але повний злам відбувся у перерізі А–А (рис. 2), який лежить в площині симетрії заднього кронштейна, в якому згинальні зусилля, що діють на гребний вал, досягають своїх максимальних значень. На цьому зламі, який утворився під дією згинальних та крутних зусиль [5], можна спостерігати ділянку втомного підростання тріщини та зону долому, а ближче до поверхні вала – перехресні втомні тріщини, що вказує на їх зародження в багатьох місцях, які тільки на пізніших стадіях руйнування об'єднуються в одну магістральну кільцеву тріщину. Це свідчить про закономірність процесу зародження тріщин, спричинену певними умовами, а не випадковістю. Зазначимо також значну глибину втомного підростання тріщини, що вказує на загалом високий рівень циклічної в'язкості руйнування, за досягнення якого відбулось неконтрольоване руйнування вала.

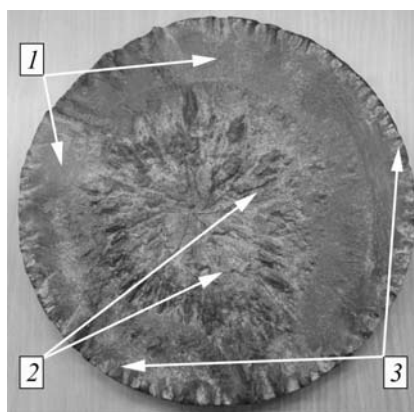


Рис. 2. Втомний злам гребного вала в перерізі А–А: 1 – зона втомного поширення тріщини; 2 – долам; 3 – вогнища руйнування по контуру вала.

Fig. 2. Fatigue fracture surface of a propeller shaft in the cross-section A–A: 1 – zone of fatigue crack propagation; 2 – rupture area; 3 – fracture initiation on the shaft countour.

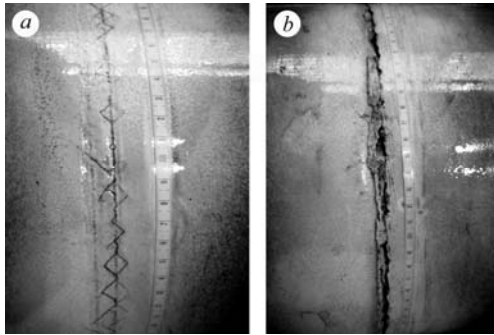


Рис. 3. Ділянки гребного вала з утомними тріщинами в перерізах В–В (а) та С–С (б).

Fig. 3. Parts of the propeller shaft with fatigue cracks in the cross-sections В–В (а) and С–С (б).

Тріщини, що виникли в перерізах В–В і С–С, показані на рис. 3. Як бачимо, в перерізі С–С відсутні великі фрагменти матеріалу через його викришування внаслідок поєднання між собою локальних тріщин. Тріщини там глибші порівняно з перерізом В–В, а руйнування інтенсивніше з двох причин: швидша розгерметизація з'єднання і, як наслідок, триваліша дія корозійного чинника, або більший згинний момент у цьому перетині.

Поява втомних тріщин не в місцях геометричних концентраторів напружень, а в зонах розгерметизації втулки свідчить про відповідальність корозійної втоми за руйнування [6]. Через дію циклічних напружень скручування та згину на стиках поверхонь вала і втулки відбуваються малі проковзування, при цьому тертя усуває поверхневі шари оксидів і відкриває доступ морської води до свіжоутворених поверхонь, тобто одночасно реалізуються процеси електрохімічної корозії і трибокорозії. Зазначимо також, що в цих місцях корозія сталльної поверхні додатково прискорюється за рахунок дії електрохімічної гальванопари у зв'язку зі значною різницею потенціалів сталі і бронзи (~0,5 V).

Таким чином, виготовлення гребних валів з низьколегованих сталей, які відзначаються високою втомною міцністю, а також циклічною тріщиностійкістю на повітрі, може не забезпечити тривалої безпечної експлуатації через чутливість матеріалу до дії корозійного чинника у морській воді. Проблема можна вирішити конструкційними підходами, які б унеможливили доступ агресивного середовища до сталльної поверхні вала.

**РЕЗЮМЕ.** Проанализированы причины и характер эксплуатационного повреждения гребного вала морского судна, изготовленного из низколегированной стали. Установлено, что причина повреждения – коррозионная усталость металла, хотя механические характеристики стали на воздухе удовлетворительные, а длительная эксплуатация вала может быть обеспечена благодаря защите его материала от морской воды.

**SUMMARY.** The reasons and character of service damage of the shaft of the sea craft, made of low alloyed steel have been analyzed. It was established, that the reason of fracture is metal corrosion fatigue, though the mechanical characteristics of steel in air are satisfactory, and a long-term service of the shaft can be provided by protection of its material against the sea water effect.

1. *Cudny K.* Linie wałów okrętowych. Konstrukcje i obliczenia. – Gdańsk: Wydawnictwo Morskie, 1990. – 338 s.
2. *Dobrzański L. A.* Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo. Materiały inżynierskie z podstawami projektowania materiałowego. – Gliwice-Warszawa: WNT, 2002. – S. 1516.
3. *Estimation methods for fatigue properties of steels under axial and torsional loading / K. S. Kim, X. Chen, C. Han, H. W. Lee // Int. J. of Fatigue. – 2002. – 24. – P. 783–793.*
4. *Grudziński K., Jaroszewicz W., Lorkiewicz J.* Posadawianie maszyn na podkładkach z tworzywa sztucznego // Przegląd Mechaniczny. – 1983. – XLII, № 21. – S. 9–15.
5. *Kocańda S.* Zmęczeniowe pękanie metali. – Warszawa: WNT, 1985. – 384 s.
6. *Усталостная прочность крупногабаритных поверхностно-упрочненных валов в прессовом соединении / Г. Н. Филимонов, В. И. Похмурский, Р. Г. Погорецкий и др. // Физ.-хим. механика материалов. – 1975. – 11, № 3. – С. 20–25.*  
(*Fatigue strength of heavy-duty surface-hardened shafts in a press-fitted joint // G. N. Filimonov, V. I. Pokhmurskii, R. G. Pogoretskii et al. // Soviet Materials Science. – 1975. – 11, № 3. – P. 266–270.*)

Одержано 10.10.2012