

УДК 669.14: 178

ОПІР КАВІТАЦІЙНО-ЕРОЗІЙНОМУ ТА ВТОМНОМУ РУЙНУВАННЮ ЛИСТОВИХ СУДНОБУДІВНИХ СТАЛЕЙ

О. І. БАЛИЦЬКИЙ¹, Я. ХМЕЛЬ²

¹ Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

² Морська академія, Щецін, Польща

Рекомендовано мікролеговану бором сталь SSAB Domex, яка має підвищений опір корозійно-ерозійному руйнуванню та малоцикловій втомі, замість існуючої 18Mn2 у водному транспорті та в елементах гідротехнічних споруд, що піддаються впливу сильних потоків води. Зокрема, в соплах Корта, приводах стерна, частинах корпусів річних суден, які особливо чутливі до ерозії.

Ключові слова: кавітаційне руйнування, малоциклова втома, суднобудівна сталь, експлуатаційна деградація.

Опірність кавітаційно-ерозійному руйнуванню (КЕР) металевих матеріалів часто визначає робоздатність елементів конструкцій, при цьому тут у першу чергу враховують дію ударного циклічного навантаження від розриву на поверхні кавітаційних бульбашок. Тому, досліджуючи таке руйнування, будують кореляційні залежності між опором йому та твердістю матеріалу [1], а також враховують енергію кавітації [2–4]. З іншого боку, слід брати до уваги, що кавітаційне середовище є корозійно-агресивним, чому сприяє особливий стан поверхневого шару, пов'язаний з циклічністю деформування та усуненням бар'єрних плівок, які гальмують корозію та проникнення водню вглиб металу [5, 6].

Корпусні сталі суден теж повинні володіти високою опірністю КЕР у поєднанні з підвищеними втомними характеристиками, в тому числі на стадії росту тріщин [7]. Оскільки внаслідок кавітаційного та циклічного навантаження в приповерхневому шарі виникають однакові напруження, можна підбирати матеріали та методи їх оброблення із задовільними для суднобудівної промисловості властивостями. Однак проблема ускладнюється деградацією властивостей сталей під час тривалої експлуатації, включаючи і опірність КЕР та втомному руйнуванню.

Нижче порівняно за опірністю КЕР та малоцикловій втомі дві сталі, одну з яких вже досить довго використовують у суднобудівній промисловості, а іншу рекомендують.

Методика експерименту. Досліджували феритно-перлітну низьковуглецеву листову сталь 18Mn2 у вихідному стані та після 10 і 30 років експлуатації [8], а також середньовуглецеву SSAB Domex, мікролеговану бором (0,28% С, 0,25 Si, 1,21 Mn, 0,53 Cr і 0,0033% В). Для випроб використали вібраційне устаткування зі стаціонарним зразком на основі ультразвукового процесора VCX-500 Sonics [9] та циліндричні зразки діаметром 13 mm і висотою 4...5 mm, діаметр екс повної ділянки 11,28 mm. Робочу поверхню зразка полірували абразивним папером марок 200–1000, а потім – алмазними порошками з розміром зерен 3...1 μm. Випробовували щонайменше три зразки.

Зразки кавітаційно навантажували упродовж 60 min, змінюючи навантаження від 0,2 до 100 kWt/m² та амплітуду коливань [10], а гравіметричними вимірю-

ваннями визначали втрату маси за цей період кавітації.

На малоциклову довговічність випробували плоский зразок розмірами робочої частини 15×6×3 mm, вирізаний із листового металу та навантажений за жорсткою схемою циклічним чистим віднульовим згином за амплітуд 0,8, 1,2 і 1,6% і частоти 0,5 Hz [11]. Критерієм малоциклової втоми була кількість циклів до руйнування зразка для заданої амплітуди.

Результати та їх обговорення. За опірністю КЕР (рис. 1) сталь Domex у вихідному стані виявила кращі властивості (крива 1), що викликано як вищим вмістом вуглецю, так і мікролегуванням бором. Перший чинник сприяє її зміцненню та зменшенню частки фериту, який полегшує розповсюдження кавітаційних тріщин [5], а другий гальмує поглинання металом водню [10]. Зазначимо, що втрату маси під час КЕР часто пояснюють механізмом зародження та поширення в мікрооб'ємах поверхневого шару тріщин, який полегшений у наводненому металі. Тому, гальмуючи наводнювання, можна знижувати інтенсивність КЕР.

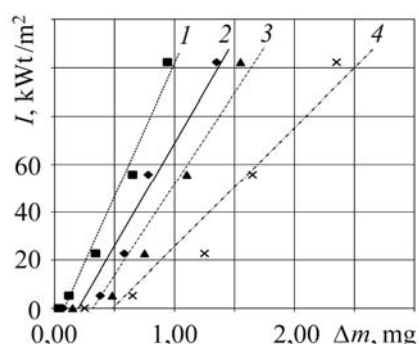


Рис. 1. Усереднені значення втрат маси після 60 min кавітаційного навантаження зразків зі сталей Domex (1) і 18Mn2 (2–4) у вихідному стані (1, 2) та після 10 (3) і 30 (4) років експлуатації.

Fig. 1. Average values of mass loss after 60 min of cavitation exposition of specimens from steels Domex (1) and 18Mn2 (2–4) in as-received state (1, 2) and after 10 (3) and 30 (4) years of service.

Сталь 18Mn2 (крива 2) не тільки поступається сталі Domex за опором КЕР, але виявилася особливо чутливою до експлуатаційної деградації за цим показником (криві 3 і 4). Зокрема за однакового кавітаційного навантаження зразки зі сталі 8Mn2, експлуатованої 10 і 30 років, втрачають у 1,5 і 2,5 рази більше маси.

Суттєва втрата опору КЕР узгоджується з відомими закономірностями різкого зниження опору низьколегованих сталей крихкому руйнуванню та водневу окрихченню після 20 років експлуатації [12, 13], що пов'язують з розвитком у металі розсіяної пошкоженості.

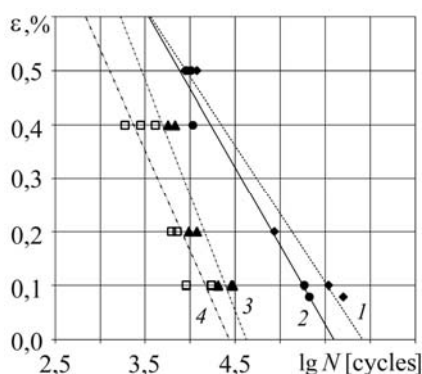


Рис. 2. Малоциклова втома сталей Domex (1) і 18Mn2 (2–4) у вихідному стані (1, 2) та після 10 (3) і 30 (4) років експлуатації.

Fig. 2. Low-cycle fatigue of steels Domex (1) and 18Mn2 (2–4) in as-received state (1, 2) and after 10 (3) and 30 (4) years of service.

Порівняльні результати випроб обох сталей на малоциклову втому демонструють аналогічні закономірності (рис. 2). Найбільша довговічність властива сталі Domex (крива 1), а нижча – сталі 18Mn2 (криві 2–4) залежно від її експлуатації. Зазначимо, що за малоциклової втоми конструкційні сталі особливо чутливі до водневої крихкості, чому сприяє їх тривала експлуатація. Тому можна очікувати, що відмінності у втомній витривалості для вихідного і експлуатованого станів

проявляться ще сильніше за випроб на малоциклову втому в корозивно-наводнювальних середовищах. Що стосується мікролегованої бором сталі Domex, то тут можна сподіватися на позитивний вплив такого мікролегування.

Таким чином, виявлено переваги мікролегованої бором сталі Domex за дії КЕР та малоциклової втоми, що дає можливість рекомендувати її для конструкцій, що піддаються таким навантаженням, зокрема, у водному транспорті (сопла Корта, приводи стерна) та в елементах гідротехнічних споруд.

РЕЗЮМЕ. Микролегированную бором сталь SSAB Domex, обладающую повышенной малоцикловой долговечностью, рекомендовано вместо стали 18Mn2 в элементах гидротехнических строений, которые подвергаются влиянию сильных потоков воды. В частности, в соплах Корта, приводах руля, частях корпусов речных судов, которые особенно чувствительны к эрозии.

SUMMARY. Boron-microalloyed steel SSAB Domex with increased low-cycle durability is proposed to be used instead of 18Mn2 steel in hydrotechnical elements of structures, subjected to the flow water effect, in particular in Cort inlets, rudder drive, parts of the river ships, which are especially sensitive to erosion.

1. *Маринін В. Г.* Взаємозв'язок між кавітаційною тривкістю та мікротвердістю металів // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2009. – **45**, № 6. – С. 127–129.
(*Marynin V. H.* Interrelation between the cavitation resistance and microhardness of metals // Materials Science. – 2009. – **45**, № 6. – P. 905–907.)
2. *Balraud-Célérier F. and Barbier F.* Investigation of models to predict the corrosion of steels in flowing liquid lead alloys // J. Nucl. Mater. – 2001. – **289**. – P. 227–242.
3. *Dular M.* Numerical modelling of cavitation erosion // Int. J. Numer. Methods Fluids. – 2009. – **3**. – 058–1410. doi:10.1002/flid.2003.
4. *Балицький О., Хмель Я., Трояновський Я.* Деградація сталей корпусів річкових суден // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2007. – № 3. – С. 117–120.
(*Balyts'kyi O., Chmiel J., and Trojanowski J.* Degradation of steels of inland ship hulls // Materials Science. – 2007. – № 3. – P. 434–438.)
5. *Роль водню в кавітаційному руйнуванні сталі 45 у змащувальних середовищах* / О. І. Балицький, Я. Хмель, П. Краузе та ін. // Там же. – 2009. – **45**, № 5. – С. 39–42.
(*Balyts'kyi O., Chmiel J., Krause P., J., Niekrasz P., and Maciag M.* Role of hydrogen in the cavitation fracture of 45 steel in lubricating media // Materials Science. – 2009. – **45**, № 5. – P. 651–654.)
6. *Цирульник О. Т.* Використання методів електрохімії в діагностуванні технічного стану конструкційних матеріалів // Там же. – 2013. – **49**, № 4. – С. 29–39.
(*Tsyruľnyk O. T.* Application of the electrochemical methods in the diagnostics of the engineering state of structural materials // Materials Science. – 2014. – **49**, № 4. – P. 449–460.)
7. *Fatigue crack growth rates of S235 and S355 steels after friction stir processing* / D. Kocanda, V. Hutsaylyuk, T. Sleza et al. // Materials Sci. Forum. – 2012. – **726**. – P. 203–210.
8. *Балицький О. І., Хмель Я., Доробчинський Л.* Аналіз електрохімічних осциляцій в умовах вібраційної кавітації // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2011. – **47**, № 1. – С. 24–28.
(*Balyts'kyi O. I., Chmiel J., and Dorobczynski L.* Analysis of electrochemical oscillations under conditions of vibration cavitation // Materials Science. – 2011. – **47**, № 1. – P. 21–25.)
9. *Badania zużycia korozyjno-kawitacyjnego na stanowisku wibracyjnym ze spoczywającą próbka* / J. Chmiel, J. Steller, A. Krella, W. Janicki // Probl. Eksploat. – 2010. – **1**. – P. 91–100.
10. *Chmiel J. and Lunarska E.* Effect of Cavitation on Absorption and Transport of Hydrogen in Iron // Solid State Phenom. – 2012. – **183**. – P. 25–30.
11. *The high- and low-cycle fatigue behaviour of Ni-contain steels and Ni-alloys in high pressure hydrogen* / A. Balytskii, V. Vytvytskyi, L. Ivaskevich, J. Elias // Int. J. of Fatigue. – 2012. – **39**. – P. 32–37.
12. *Effect of the long-term service of the gas pipeline on the properties of the ferrite-pearlite steel* / H. Nykyforchyn, E. Lunarska, O. Tsyruľnyk et al. // Mater. and Corr. – 2009. – № 9. – P. 716–725.
13. *Крижанівський Є. І., Никифорчин Г. М.* Особливості корозійно-водневої деградації сталей нафтогазопроводів і резервуарів зберігання нафти // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2011. – **47**, № 2. – С. 11–20.
(*Kryzhaniv's'kyi E. I. and Nykyforchyn H. M.* Specific features of hydrogen-induced corrosion degradation of steels of gas and oil pipelines and oil storage reservoirs // Materials Science. – 2011. – **47**, № 2. – P. 127–136.)

Одержано 27.07.2014