

УДК 620.197:667.637.22

КАВІТАЦІЙНА ТРИВКІСТЬ МОДИФІКОВАНИХ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ ЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ

В. Г. МАРИНІН

Національний науковий центр "Харківський фізико-технічний інститут"

Досліджено міцність в умовах кавітації сталей 15X11МФ і 15X12ВНМФ після азотування та нанесення вакуумно-дугових титанових і нітридотитанових покривів. Одержано кінетичні криві руйнування зразків за дії кавітації, поляризаційні криві у 3%-му водному розчині NaCl, виміряно мікротвердість. Термоцикловано систему сталь–покриви за схемою 293 К – 543 К – 293 К з охолодженням у 3%-му розчині NaCl. Підтверджена роботоздатність системи.

Ключові слова: *кавітаційна тривкість сталей, азотування, покриви, роботоздатність.*

Для деяких елементів енергетичного обладнання, які функціонують при 883... 850К і виготовлені зі сталей 15X11МФ, 15X12ВНМФ, необхідно продовжити термін міжремонтної експлуатації. Хоча сталі загалом і мають задовільні механічні характеристики, в тому числі жаротривкість та жароміцність, однак, вони недостатньо ерозійно тривкі в умовах дії кавітації і кородують у хлоридовмісних середовищах. Можливість збільшити, зокрема, їх ерозійну тривкість шляхом застосування низки процесів холодного деформування досліджена раніше [1]. Показано, що її можна збільшити в 1,5 рази. Однак, враховуючи той факт, що для багатьох експлуатаційних деталей не можна застосувати такі процеси модифікації, актуальним залишається пошук інших способів ефективного зміцнення поверхні сталі. Нижче досліджено збільшення тривкості сталей після азотування та нанесення покривів.

Методи досліджень. Випробовували сталеві зразки розміром (25×15×6) mm, поверхні яких заздалегідь полірували. Азотували при температурі 833 К впродовж 48 h в атмосфері аміаку. Покриви наносили на модернізованій установці типу "Булат". Катод вакуумно-дугового розряду виготовляли із титану марки ВТ1-0. Силу струму дугового розряду в різних експериментах змінювали від 65 до 135 А. Негативний потенціал на зразках – від 0 до 250 V під час нанесення титанових покривів і підтримували сталим і рівним 200 V, формуючи покриви із нітриду титану. Камеру із зразками відкачували пароліновими дифузійними насосами до тиску $8 \cdot 10^{-5}$ Pa. Тиск азоту змінювали до граничних значень 2,6 Pa. Титанові покриви одержані при температурі зразків від 300 до 1040 К, а із нітриду титану – при 770 К. Дію кавітації досліджували на установці і за методикою, описаними в праці [2]. Кавітаційну зону створювали у водогінній воді ультразвуковим вібратором експоненційного профілю, амплітуда коливань поверхні якого – (30 ± 2) μ m, частота $(21 \pm \pm 1,5)$ kHz. Відстань між торцем вібратора і поверхнею зразка 0,5 mm. Вимірювали вагові втрати зразків з точністю 0,015 mg. Кавітаційну тривкість матеріалів визначали за співвідношенням $Z_c = V_0/V_i$, де V_0 – швидкість руйнування еталона (0,28 nm/s); V_i – швидкість руйнування на інтервалі кінетичної кривої,

Контактна особа: В. Г. МАРИНІН, e-mail: kartmazov@kipt.kharkov.ua

де вона стала або повільно змінюється. Абразивне зношування досліджували за схемою площина–диск. Експериментальні зразки (площина) завбільшки $15 \times 15 \times 3$ mm, а диск діаметром 15 mm із жорстко закріпленими абразивними зернами. Лінійна швидкість диска біля поверхні зразка 4,4 m/s, час випробувань 300 s. Зносотривкість за абразивної дії Z_a обчислювали, як у праці [3]. Мікротвердість H_μ вимірювали приладом ПМТ-3 під навантаженням 0,196 і 0,49 N.

Корозійні властивості визначали за результатами поляризаційних вимірювань з використанням потенціостата ПИ50-1. Потенціал змінювали ступінчасто на 0,1 V і витримували значення впродовж 180 s. Значення густини струму на поляризаційних кривих подані для вимірювань за третьої зміни потенціалу від негативних значень до позитивних.

Результати досліджень. Структури азотованих шарів сталей (рис. 1) відрізняються за своїм характером, зокрема, і товщиною. Товщина азотованого шару сталі 15X12ВНМФ близько 120 μm , а сталі 15X11МФ – 160 μm . Їх мікротвердість відрізняється на одній і тій самій відстані від поверхні зразка не більше ніж на 8% із систематично вищими значеннями для сталі 15X12ВНМФ. Зокрема, на відстані 30 μm вона становить 600 GPa, а для 15X11МФ – 560 GPa. Абразивна тривкість поверхневих шарів після азотування збільшується в 1,5–2 рази. Кавітаційну тривкість репрезентують кінетичні криві залежності середньої глибини руйнування азотованих шарів сталей від часу дії кавітації (рис. 2). Для порівняння подані кінетичні криві сталі 15X11МФ у стані постачання і цієї сталі та 15X12ВНМФ після видалення з їх поверхні шару завтовшки 0,5 mm. Крива 1 відрізняється від інших суттєвим часовим інтервалом з незначним руйнуванням, тобто більшою пластичністю вихідних зразків сталей проти термооброблених під час азотування.

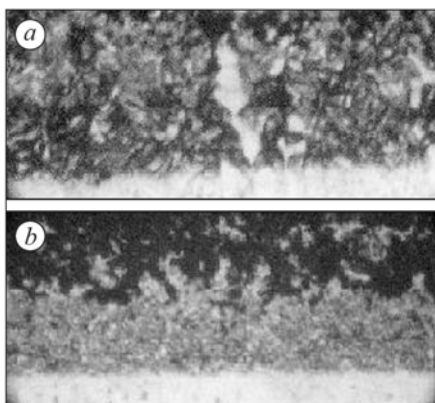


Рис. 1. Fig. 1.

Рис. 1. Структура сталей 15X12ВНМФ (a) і 15X11МФ (b) після азотування.

Fig. 1. Structure of steels 15X12ВНМФ (a) and 15X11МФ (b) after nitriding.

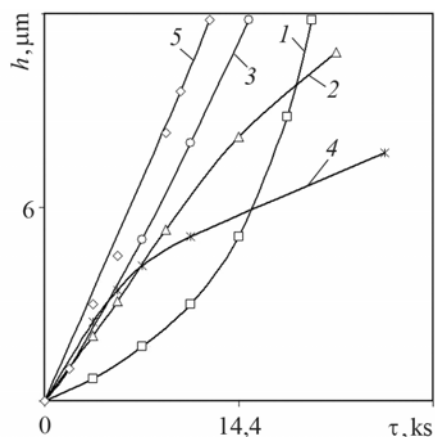


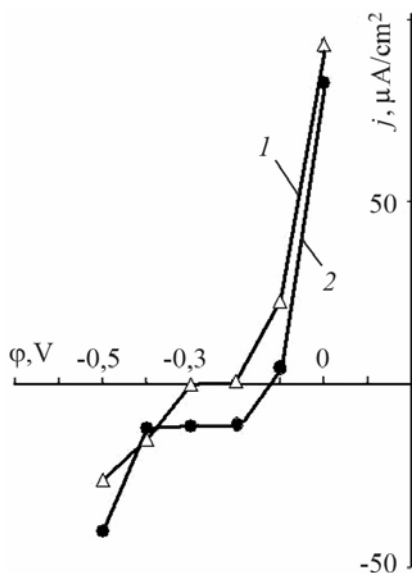
Рис. 2. Fig. 2.

Рис. 2. Залежності середньої глибини руйнування (h) зразків сталей 15X11МФ (1–3) та 15X12ВНМФ (4, 5) від тривалості кавітаційних випробувань: 1 – сталь у стані постачання; 2, 4 – після азотування; 3, 5 – без азотованого шару.

Fig. 2. Average depth of fracture (h) of 15X11МФ (1–3) and 15X12ВНМФ (4, 5) steel specimens versus duration of cavitation tests: 1 – steel in as-received state; 2, 4 – after nitriding; 3, 5 – without a nitrided layer 0.5 mm thick.

Кавітаційну тривкість всіх зразків обчислено за результатами швидкості руйнування, яку визначали на квазілінійній ділянці кінетичних кривих (див. таблицю).

Характеристика	Номер зразка відповідає номеру кривої на рис. 2						Покриви	
	0 (еталон)	1	2	3	4	5	Ti	Ti-N
Кавітаційна тривкість, Z_c	1	0,3	~1,1	0,33	~2,0	0,24	0,1...0,4	Від 1,1 до >10



Азотування підвищує кавітаційну тривкість зразків сталі 15X11МФ в 3,6 рази, а сталі 15X12ВНМФ – в 8,1 рази порівняно із неазотованими, хоч відносно еталона маємо значно менше збільшення.

Корозійні властивості азотованих сталей описують поляризаційні криві (рис. 3). Значення потенціалу подано відносно нормального водневого електрода.

Рис. 3. Поляризаційні криві у 3%-му розчині NaCl азотованих сталей 15X11МФ (1) і 15X12ВНМФ (2).

Fig. 3. Polarization curves of 15X11MФ (1) and 15X12ВНМФ (2) nitrided steels in 3% NaCl solution.

У 3%-му розчині NaCl інтенсивне розчинення сталі 15X11МФ починається при $-0,2$ V, а сталі 15X12ВНМФ – при $-0,1$ V за незначного інтервалу пасивного стану. Стаціонарні потенціали, виміряні після 600 s витримки в корозивному середовищі, становлять $-0,34$ та $-0,33$ V відповідно, що підтверджує низьку корозійну тривкість сталей. Для збільшення їх корозійної та ерозійної тривкості використали покриви із декількох шарів титану та нітриду титану. Титанові покриви одержані за залишкового тиску у вакуумній камері біля $8 \cdot 10^{-5}$ Pa (рис. 4).

Як бачимо, стаціонарний потенціал, густина корозійного струму та швидкість ерозії під час кавітації змінюються із зміною мікротвердості. Їх значення проходять через екстремум, який зафіксовано за мікротвердості $\sim 1,7$ GPa.

Характеристики покровів типу Ti-N наведено раніше [3, 5–7]. Встановлено, що мікротвердість і швидкість ерозії покровів за кавітації максимальні, якщо тиск азоту у вакуумній камері під час їх формування $0,03 \dots 0,05$ Pa, і мінімальні за тиску $0,4 \dots 0,6$ Pa, який відповідає формуванню покровів стехіометричного складу. Зв'язок ступеня ерозії з іншими характеристиками механічних властивостей покровів з допомогою моделі руйнування [8] можна визначати за співвідношенням $Z_c = CW^{0,75}H^{0,5}$, де C – потужність дії кавітації і є константа за фіксованих умов експерименту; W – в'язкість руйнування; H – твердість матеріалу. Досліджено корозію покровів у середовищах, які імітують умови роботи елементів енергетичного обладнання. Встановлено, що в 3%-му розчині NaCl при 385 K на сталі пітінги з'являються вже після 120 h з подальшим розтріскуванням, а покриви на основі титану залишаються непошкодженими впродовж 4000 h випробувань і в 22%-му розчині NaCl, і 28%-му розчині NaOH. Визначено також параметри технологічного процесу нанесення покровів, які забезпечують підвищення корозійно-втомної та ерозійної тривкості більш ніж у 1,5 рази.

Для перевірки термотривкості системи сталь–покриви та адгезії покровів десятиразово термоцикували з нагріванням зразків до температури 543 K і

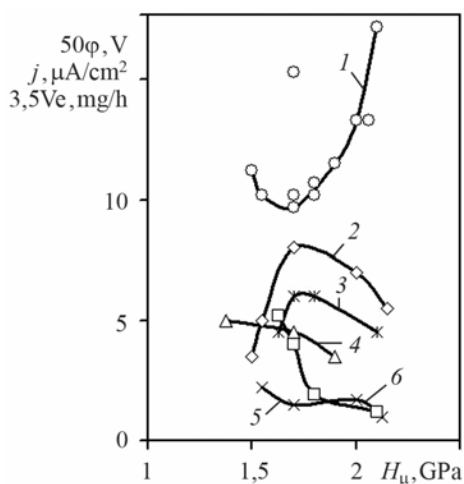


Рис. 4. Залежність стаціонарного потенціалу (1), корозійного струму (2, 3), швидкості ерозії (5, 6) від мікротвердості покриттів для сили струму 65 А (2, 3, 5, 6) та 135 А (4).

Fig. 4. Stationary potential (1), corrosion current density (2, 3), of erosion rate (5, 6) versus coating microhardness for currents of arc 65 A (2, 3, 5, 6) and 135 A (4).

15X11МФ, 15X12ВНМФ после азотирования и нанесения вакуумно-дуговых Ti и Ti-N покрытий. Показано, что покрытия увеличивают прочность и коррозионную стойкость сталей.

SUMMARY. Cavitation strength of nitrided 15X11МФ, 15X12ВНМФ steels and vacuum-arc Ti, Ti-N coatings in tap water and corrosion in the 0.5 M NaCl solution were investigated. It has been found that the use of coatings will provide the increase of steels corrosion resistance.

1. Маринін В. Г. Кавітаційна тривкість холоднодеформованих сталей та міді // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2007. – № 3. – С. 89–92.
2. Коваленко В. І., Маринін В. Г. Обладнання для дослідження ерозії покриттів при мікроударній дії // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – 1998. – Вып. 5(71). – С. 83–85.
3. Маринин В. Г. Эрозия PVD-покрытий при воздействии кавитации и пароводяного конденсата // Сб. докл. ICVTE-5. – Харьков: ННЦ ХФТИ, ИПЦ “Контраст”, 2002. – С. 177–180.
4. Маринін В. Г. Тривкість вольфрам-рениєвого сплаву під мікроударами // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2005. – № 4. – С. 121–123.
5. Маринін В. Г., Коваленко В. І. Розробка дослідно-промислової технології і устаткування для антикорозійного захисту лопаток турбін, що працюють у зоні двофазних потоків // Зб. наук. статей “Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин”. – К.: ІЕЗ ім. Є. О. Патона, “Фирма ЭССЕ”, 2006. – С. 300–305.
6. Маринин В. Г. Защитные покрытия для увеличения срока эксплуатации рабочих лопаток зоны фазового перехода паровых турбин тепловых и атомных электростанций // Зб. наук. праць СЧУЯЕ та П. – Севастополь: ИЦ СНИЯЭ и П., 2005. – Вып. 15. – С. 136–142.
7. Исследование эрозии покрытий из нитрида титана под воздействием кавитации и воздушно-абразивного потока / Г. Н. Картмазов, В. И. Коваленко, В. В. Кунченко, В. Г. Маринин // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – 1998. – Вып. 5(71). – С. 71–74.
8. Evans A. G. and Wilshaw T. R. Quasi – static solid particle damage in brittle solids. 1. Observation, analysis and implication // Acta Met. – 1976. – 24. – P. 936–956.

Одержано 20.02.2009

охлаждением при 293 К в 3%-му водному раствору NaCl. Досліджено зразки у вигляді дисків діаметром 18 mm, на один бік яких нанесені покриття, а також зразки у вигляді смужок завдовжки 60 mm, шириною 7 mm, виготовлені із нержавної сталі, і після нанесення на них покриттів, зігнутих на кут 180°. Виявлено, що в зразках після випробувань відсутні тріщини і відшарування, що підтверджує роботоздатність системи, яка складається із азотованої сталі з комбінованими покриттями титан–нітрид титану на поверхні.

ВИСНОВОК

Завдяки азотуванню з подальшим нанесенням на поверхню комбінованих титанових і нітридотитанових покриттів підвищено кавітаційну та корозійну тривкість системи.

РЕЗЮМЕ. Исследованы кавитационная прочность в водопроводной воде и коррозия в 0,5 М водном растворе NaCl сталей