

Коваленко В. І.,
Маринін В. Г.

КАВІТАЦІЙНА ТА АБРАЗИВНА СТІЙКІСТЬ ЛЕГКОПЛАВКИХ МЕТАЛІВ

Представлені результати дослідження міцності металів IA-IVA груп періодичної системи елементів ім. Д. І. Менделєєва в умовах дії на них кавітації і жорстко закріплених абразивних частинок. Отримано дані про взаємозв'язок кавітаційної та абразивної стійкості з мікротвердістю досліджених металів. На основі отриманих експериментальних даних складені рівняння регресії.

Ключові слова: метали 1A-IVA груп, стійкість, кавітація, абразивний знос, мікротвердість, рівняння регресії.

1. Вступ

Потреба в детальному вивченні питання про кавітаційну та абразивну стійкості легкоплавких металів пов'язана із їх використанням для формування захисних та декоративних покриттів на деталях машин і механізмів, що працюють у відповідних умовах, включаючи екстремальні.

Мета роботи — встановити залежність між міцністю при дії кавітації та абразивним зносом і однією або декількома іншими механічними характеристиками металів.

2. Аналіз публікацій за темою досліджень

В роботі [1] подано загальні відомості про умови виникнення кавітації, її характеристики та обладнання для відповідних досліджень. Наведено ряд даних про руйнування твердих матеріалів, а матеріали, які досліджено в даній роботі практично не вивчалися. В деякій мірі це зроблено в роботі [2] в умовах взаємодії із потоками крапель рідини (зокрема дощу). Виходячи із необхідності мати для практичного використання відповідні дані нами проведено дослідження по їх визначенню.

3. Матеріали, обладнання та методи досліджень

Ерозію зразків при дії кавітації вивчали на установці, створеній в ННЦ ХФТІ [3]. Детальний опис схеми та її елементів подано в праці [4]. Кавітаційну зону створювали у ванні з рідиною за допомогою ультразвукових хвиль, що випромінюються вібратором експоненціального профілю. Сигнал від генератора електричних коливань подається на магнітострикційний перетворювач, який механічно з'єднаний з концентратором (вібратором). Під торцевою поверхнею концентратора, розташованого в ванні з рідиною формується зона із розвиненою кавітацією. В цій зоні на відстані 0,55 мм від торця концентратора розміщували зразки для досліджень. Амплітуда коливань поверхні вібратора дорівнювала 30 ± 2 мкм, а частота — 20 кГц. Ерозію зразків вимірювали гравіметричним методом. Точність виміру вагових втрат $\pm 0,015$ мг. За методикою проведення експериментів передбачено зважування зразків через певні проміжки часу залежно від їхньої ерозійної стійкості. За експериментальними даними будували кінетичні криві масових втрат зразків. Після чого визначали середню швидкість

руйнування матеріалу зразків, шляхом ділення вагових втрат на час експозиції зразків в умовах дії кавітації.

Для порівняння стійкості (Z_k) різних матеріалів до дії кавітації обчислення проводили за співвідношенням $Z_k = \frac{V_0}{V_i}$, де V_0 , V_i — відповідно швидкість ерозії еталона (1 мкм/год) і середня швидкість досліджуваного зразка.

Абразивний знос зразків вимірювали за схемою площина — диск. Швидкість руху поверхні диска, яка контактує з поверхнею зразка, дорівнює 4,38 м/с при навантаженні зразка 2,2 Н. Вимірювали масові втрати за фіксований інтервал часу та обчислювали середню швидкість руйнування з наступним визначенням стійкості. Інші властивості зразків вивчали за стандартними методиками. Мікротвердість, зокрема, вимірювали за допомогою прибора ПМТ-3.

4. Експериментальні результати проведених досліджень металів Pb, Sn, Cd, Zn, Al, Cu

Реальні спостереження за кавітацією показали, що в зоні її існування генеруються значні гідродинамічні збурення, дія для яких на оточуючі тверді тіла проявляється в руйнуванні (ерозії) контактуючих поверхонь. Величина руйнувань залежить як від властивостей матеріалу, так і характеру протікання кавітації, що визначається зокрема станом рідини та тиском в рідині. При вібраційній (ультразвукової) кавітації окрім властивостей рідини важливими є амплітуда коливань поверхні вібратора (концентратора), частота коливань, відстань між поверхнею твердого тіла і вібратора. Від цих факторів залежить величина механічних напружень, що виникають в контактуючій поверхні при захопленні кавітаційних пухирів. Зв'язок між амплітудою коливань і механічними напруженнями досліджувався в праці [5]. Напряга вимірювалась кварцевим датчиком, розташованим в центрі зони кавітації. Розмір датчика 2×2 мм і товщина 6,368 мм. На рис. 1 подано осцилограми проходження ультразвукової хвилі як без генерації кавітації, так і при її наявності.

Аналіз осцилограм показує, що в кожному циклі ультразвукової хвилі протягом декількох мікросекунд має місце захоплення каверни. Фіксуються піки напруження, величина яких залежить від амплітуди ультразвукових коливань випромінювача. Проведені розрахунки показують нелінійну залежність між величиною напруження (σ) і величиною амплітуди, що ілюструє рис. 2.

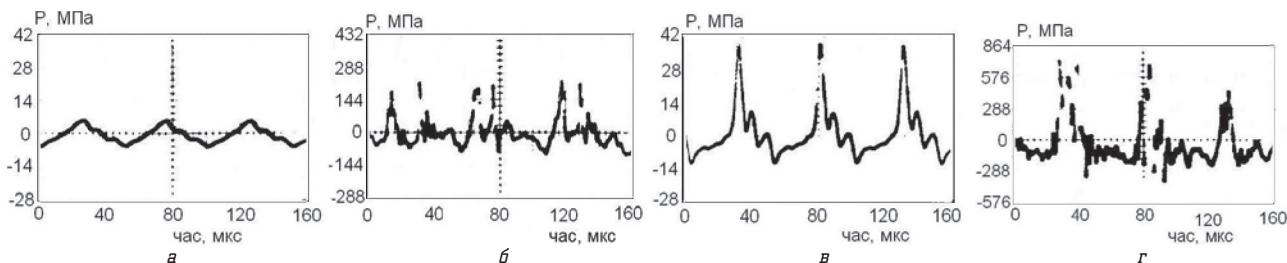


Рис. 1. Осцилограми напруги (P), яка виникає в кварцовому датчику при кавітації в дистильованій воді. Частота коливань вібратора 20 кГц: а — низька амплітуда коливань вібратора, кавітація відсутня; б–г — кавітація різної інтенсивності

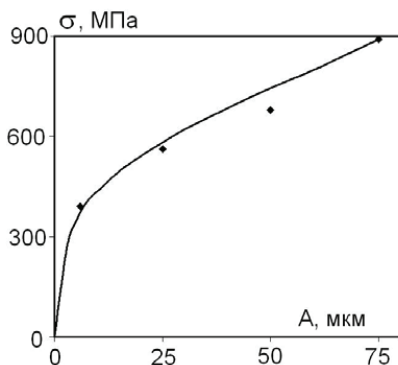


Рис. 2. Залежність середньої величини напруги (σ) в твердому тілі при кавітації від величини амплітуди коливань випромінювача А (мкм)

Дані рис. 2 показують, що середнє значення амплітуди напружень (σ) пов'язане з амплітудою коливань (А) співвідношенням: $\sigma = cA^{1/3}$, де величина *c* дорівнює 200,3 МПа · мкм^{-1/3}

Із рис. 2 видно, що експериментальні значення відрізняються від обчислених за співвідношенням не більше ніж на 5 % і тільки для *A* = 50 мкм різниця досягає 9 %.

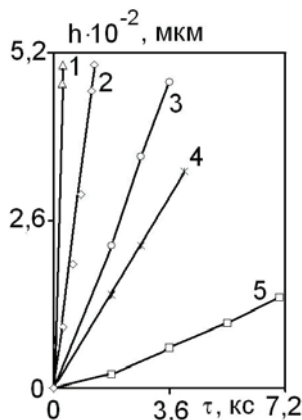


Рис. 3. Залежність глибини руйнування (h) від часу дії кавітації (τ): 1 — Рb; 2 — Sn; 3 — Cd; 4 — Zn; 5 — Cu

Під дією цих напружень відбувається ерозія поверхні металів, інтегральні величини якої в залежності від часу дії кавітації наведено для досліджуваних металів на рис. 3.

Дані рис. 3 показують, що метали з малим значенням температури і питомої теплоти плавлення руйнуються за однаковий проміжок часу дії кавітації значно більше порівняно із металами, що мають більш високі значення цих величин. Виміряно також мікротвердість і абразивну стійкість досліджуваних металів. Для характеристики абразивної стійкості введено величину 1/V, де V — об'ємні втрати на протязі 60 с за рахунок дії жорстко закріплених абразивних часток. Об'ємні втрати виміряні в см³, тобто визначена стійкість зразків відносно руйнування еталонного зразка за такий же час в розмірі 1 см³. Мікротвердість вимірювали при навантаженні 0,098 та 0,049 Н.

Залежність експериментально визначених кавітаційної стійкості (*Z_n*), абразивної стійкості (*Z_a*) та мікротвердос-

ті (*H_μ*) від сили міжатомної взаємодії в кристалічних ґратках металів наведено на рис. 4 в функції величини $m\theta^2 \cdot 10^{18}$, де *m* — маса частки, а θ — характеристична дебаєвська температура [6]. Величина $m\theta^2$ пропорційна силі, що повертає атоми в положення рівноваги при їх відхиленні із вузлів ґратки і входить до коефіцієнта жорсткості ґратки (*k*), який визначається співвідношенням [6, 7]:

$$k = 4\pi^2 \frac{\chi^2}{h^2} \cdot m\theta^2,$$

де χ , *h* — відповідно постійні Больцмана та Планка. Значення $m\theta^2$ обчислено за даними для *m* і θ , які наведено в довіднику [8]. Результати обчислень подано в табл. 1.

Маркери на кривих (1–3) відповідають даним для елементів, наведених в табл. 1 за виключенням Al для кривої (1).

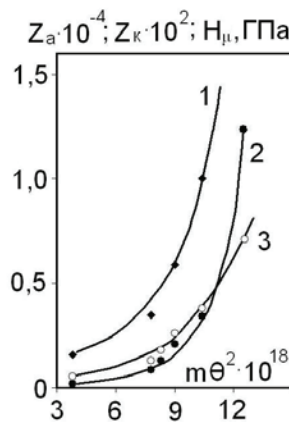


Рис. 4. Залежність абразивної (1) та кавітаційної (2) стійкості і мікротвердості (3) зразків від $m\theta^2 \cdot 10^{18}$

Таблиця 1

Величина $m\theta^2 \cdot 10^{18}$	Значення $m\theta^2$ досліджених металів					
	Елемент					
	Pb	Sn	Al	Cd	Zn	Cu
	3,86	7,9	8,24	9,0	10,4	12,6

Із рис. 4 видно, що залежності *Z_k*, *Z_a* та *H_μ* від $m\theta^2 \cdot 10^{18}$ можуть бути представлені степеневими функціями типу $y = bx^n$ при $n > 1$ і, відповідно, різними значеннями *b*, *n*.

Параболічний характер кривих показує, що виміряні механічні характеристики досліджених металів є нелінійними функціями коефіцієнта жорсткості ґратки. Взаємозв'язок між механічними характеристиками також має нелінійний характер, зокрема, $Z_k = 2,48 \cdot 10^{-2} H_{\mu}^{1,7}$, а $Z_a = 2,4 \cdot 10^4 H_{\mu}^{0,92}$ при вимірюванні мікротвердості в ГПа. Ці залежності в логарифмічних координатах подано на рис. 5.

Із рис. 5 видно, що обидві залежності відповідають прямим лініям, а проведені обчислення показують, що коефіцієнти кореляції Пірсона між дослідженими змінними величинами для ліній 1 та 2 дорівнюють 0,994 і 0,989 відповідно.

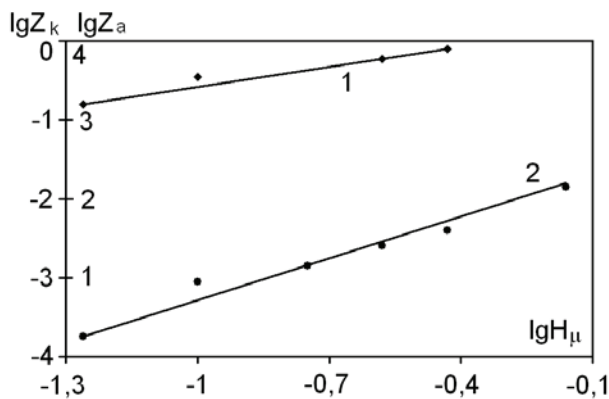


Рис. 5. Залежність абразивної (1) і кавітаційної (2) стійкостей металів від їх мікротвердості (ГПа)

Таким чином, при проведенні відповідних експериментів, вимірюючи Н_μ досліджених металів, можна визначати їх абразивну та кавітаційну стійкість без руйнування зразків.

5. Висновки

Дослідження металів ІА-ІVА груп періодичної системи елементів показали, що їх кавітаційна та абразивна стійкості (міцності) пов'язані з їх мікротвердістю нелінійними співвідношеннями. Для обох рівнянь регресії коефіцієнт кореляції близько 0,99. Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що для використання досліджених металів і покриттів на їх основі в експлуатаційних умовах, попередньо їх стійкості можна визначати за мікротвердістю [9, 10].

Література

1. Прис, К. Эрозия [Текст] : пер. с англ. / под ред. К. Прис. — М.: Мир, 1982. — 368 с.
2. Спринджер, Дж. С. Эрозия при воздействии капель жидкости [Текст] : пер. с англ. / Дж. С. Спринджер. — М.: Машиностроение, 1981. — 200 с.
3. Коваленко, В. І. Обладнання для дослідження ерозії покриттів при мікроударному діянні [Текст] / В. І. Коваленко, В. Г. Маринін // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. — 1998. — № 5(71) — С. 83–89.
4. Маринін, В. Г. Ерозія вакуумно-дугових титанових покриттів при дії кавітації [Текст] / В. Г. Маринін, В. І. Коваленко, Л. І. Мартиненко, Ю. М. Солов'ченко // Препринт ХФТІ 2008-2. — Харків: ННЦ ХФТІ, 2008. — 22 с.
5. Vyas, B. Stress produced in Solid by cavitation [Text] / B. Vyas, C. M. Prece // Journal of Applied Physics. — 1976. — V. 47, № 12. — P. 5133–5138.
6. Гольцев, В. П. Прочностные характеристики кристаллических веществ и их связь с энергией решетки и износостойкостью [Текст] // Трение и износ. — 1983. — Т. 47, № 3. — С. 415–419.

7. Ровинский, Б. М. О зависимости механических свойств твердых тел от атомного взаимодействия в решетке [Текст] / Б. М. Ровинский // Известия АН СССР, ОТН. — 1956. — № 9. — С. 55–64.
8. Дриц, М. Е. Свойства элементов [Текст] : справочник / под ред. М. Е. Дрица. — М.: Металлургия, 1985. — 672 с.
9. Маринін, В. Г. Ерозія технічно чистих металів при дії кавітації [Текст] / В. Г. Маринін // Препринт ХФТІ. — Харків: ННЦ ХФТІ, 2011. — 43 с.
10. Маринін, В. Г. Покриття для захисту елементів теплоенергетичного устаткування [Текст] / В. Г. Маринін // Східно-Європейський журнал передових технологій. — 2011. — Т. 5, № 5(53). — С. 32–37.

КАВИТАЦИОННАЯ И АБРАЗИВНАЯ СТОЙКОСТЬ ЛЕГКОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ

Представлены результаты исследования прочности металлов ІА-ІVА групп периодической системы элементов им. Д. И. Менделеева в условиях действия на них кавитации и жестко закрепленных абразивных частиц. Получены данные о взаимосвязи кавитационной и абразивной стойкости с микротвердостью исследованных металлов. На основе полученных экспериментальных данных составлены уравнения регрессии.

Ключевые слова: металлы ІА-ІVА групп, прочность, кавитация, абразивный износ, микротвердость, уравнения регрессии.

Коваленко Володимир Іванович, науковий співробітник, відділ інтенсивних вакуумно-плазмових технологій, Інститут фізики твердого тіла, матеріалознавства та технологій, Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут», Україна.

Маринін Володимир Григорович, кандидат фізико-математичних наук, доцент, старший науковий співробітник, відділ інтенсивних вакуумно-плазмових технологій, Інститут фізики твердого тіла, матеріалознавства та технологій, Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут», Україна, e-mail: marinin@kipt.kharkov.ua.

Коваленко Владимир Иванович, научный сотрудник, отдел интенсивных вакуумно-плазменных технологий, Институт физики твердого тела, материаловедения и технологий, Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», Украина.

Маринин Владимир Григорьевич, кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник, отдел интенсивных вакуумно-плазменных технологий, Институт физики твердого тела, материаловедения и технологий, Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», Украина.

Kovalenko Vladimir, Institute of solid-state physics, materials science and technologies, National Science Centre «Kharkov Institute of Physics and Technology», Ukraine.

Marinin Vladimir, Institute of solid-state physics, materials science and technologies, National Science Centre «Kharkov Institute of Physics and Technology», Ukraine, e-mail: marinin@kipt.kharkov.ua