

ЭРОЗИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ МИКРОУДАРНОМ НАГРУЖЕНИИ

*В.С. Войценья¹, В.И. Коваленко², В.Г. Маринин²,
Л.И. Мартыненко², С.И. Солодовченко¹*

¹*Институт физики плазмы ННЦ ХФТИ,*

²*Институт физики твердого тела, материаловедения и технологий ННЦ ХФТИ
Харьков, Украина*

E-mail: martynenko@kipt.kharkov.ua

Получены данные о плотности, микротвердости, структуре, средней скорости эрозии поверхностных слоев монокристаллов, поликристаллов Мо, W, аморфных сплавов на основе Zr, W при воздействии на них кавитации и при распылении ионами аргона. Установлена зависимость скоростей эрозии образцов от их микротвердости (H_{μ}). В интервале значений H_{μ} от 1,5 до 6...7 ГПа скорости эрозии изменяются для обоих видов нагружения подобным образом пропорционально H_{μ}^{-n} , где, в частности, для кавитационного воздействия $n \cong 3,6$. Минимальные значения скоростей эрозии имеют аморфные сплавы. Для образцов с $H_{\mu} > 7$ ГПа скорости эрозии возрастают, что обусловлено уменьшением пластичности материалов.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что надежность и долговечность деталей машин и механизмов связана в определенной степени с полным или частичным устранением износа поверхностных слоев материалов, обусловленным различными видами воздействия, в частности, микроударным нагружением. Особенностью микроударного воздействия являются высокая скорость нагружения, малая продолжительность, локальность и многократность. При этом напряжения, возникающие в поверхностных слоях, могут быть сравнимы с пределом прочности материала и сосредоточены в объемах, близких к размерам его структурных составляющих. Микроударное нагружение реализуется, в частности, при попадании на поверхность твердого тела частиц, обладающих высокими скоростями и твердостью, сравнимой или выше твердости материала, каплей жидкости со сверхвысокими скоростями, кавитацией. В связи с отсутствием методов прогнозирования стойкости материалов в условиях такого нагружения возникает необходимость в получении для них соответствующих экспериментальных данных, что являлось целью данной работы. Результаты могут быть использованы при выборе материалов для элементов перекачивающих насосов, работающих при возникновении кавитации, для лопаток новых паровых турбин, работающих при сверхкритических параметрах пара, а также авиационных двигателей, эксплуатируемых в условиях высокой концентрации твердых частиц.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Образцы для исследования получены от разных изготовителей. Их характеристики определены в данной работе и приведены в таблице. Данные таблицы показывают, что образцы представляют собой моно- и поликристаллы молибдена, вольфрама, а также многокомпонентные аморфные сплавы на основе циркония, вольфрама; например, образец №8 представляет собой сплав состава Zr57Cu15Al10Ni12Nb5. Микротвердость образцов

измеряли на приборе ПМТ-3 при нагрузке 0,5 Н в соответствии с ГОСТ 9450. Структуру изучали на металлографических шлифах, используя световую оптику.

Номер образца	Материал	Структура	Плотность ρ , г/см ³	Микротвердость H_{μ} , ГПа
1	Сплав	Поликристал.	7,97	1,97
2	Мо	Монокристал.	10,2	2,4
3	Мо	– « –	10,08	2,65
4	Мо	– « –	10,09	2,7
5	W	– « –	19,1	3,45
6	W	– « –	19,1	3,68
7	W	– « –	19,1	3,95
8	Сплав	Аморфн.	6,6	4,55
9	– « –	Аморфн.	6,6	4,7
10	– « –	Поликристал.	8,2	6,1
11	– « –	Аморфн.	7,2	6,3
12	– « –	– « –	7,2	6,8
13	– « –	– « –	7,2	6,9
14	– « –	Поликристал.	19,4	7,8
15	– « –	Аморфн.	10,1	8,4
16	W	Поликристал.	18,1	4,7
17	W	Поликристал.	18,8	5,36

Распыление образцов ионами аргона проводили на установке ДСМ-2 [1] с магнитным полем пробочной геометрии. Плазму создавали в условиях циклотронного резонанса. Образцы устанавливали на выходе плазмы из магнитной пробки в поле напряженностью 800 Э. Плотность ионного тока на образцы – до 1,52 мА/см², энергия ионов могла изменяться – от 0,1 до 1,5 кэВ.

Эрозию образцов при воздействии кавитации изучали на установке, описанной в работе [2]. Для создания кавитационной зоны использовались ультразвуковые волны. При этом сигнал от генератора электромагнитных волн подавался на магнито-стрикционный преобразователь, механически со-

единенный с концентратором экспоненциального профиля, что обеспечило увеличение амплитуды колебаний торцевой поверхности концентратора до (30 ± 2) мкм при частоте (20 ± 1) кГц. Под торцевой поверхностью концентратора, установленного в сосуде с водой, формируется зона с развитой кавитацией. Образец устанавливается на расстоянии $(0,5 \pm 0,05)$ мм от поверхности концентратора. Эрозию образцов в результате кавитационного воздействия и ионного распыления определяли по весовым потерям. Точность измерения весовых потерь при кавитационном воздействии равна $\pm 0,015$ мг, а при ионном – $\pm 0,025$ мг.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По типичным кинетическим кривым, представленным на рис. 1, в частности для Мо, которые характеризуют зависимость убыли массы образца от времени воздействия ионного потока или кавитации, определяли среднюю скорость эрозии образцов.

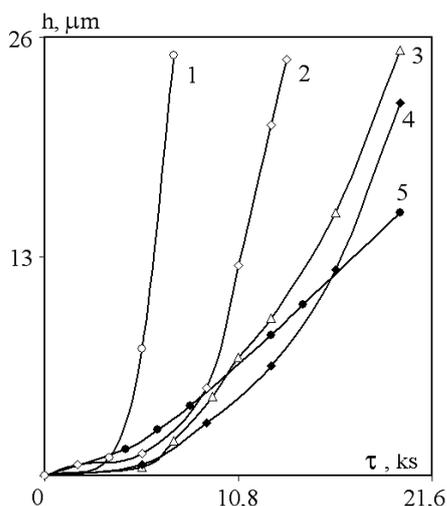


Рис. 1. Кинетические кривые эрозии основных кристаллографических плоскостей монокристалла молибдена:

- 1, 2, 5 – плоскость (100), 3 – (110), 4 – (211);
 1 – после электрополировки и отжига,
 2, 4 – образцы без отжига, электрополированные,
 5 – поликристалл, полученный деформированием из монокристалла (100)

Данные рис. 1 показывают, что эрозия образцов зависит от их предварительной обработки. Для монокристаллов наблюдается анизотропия в разрушении различных кристаллографических плоскостей.

На основе анализа полученных для всех образцов кинетических кривых, а также измерения других характеристик (плотности образцов, площади зоны эрозии, микротвердости) установлена зависимость средней скорости эрозии от H_{μ} . Такая зависимость приведена на рис. 2 для образцов при кавитационном воздействии.

Для образцов при облучении потоками ионов азота показана на рис. 3.

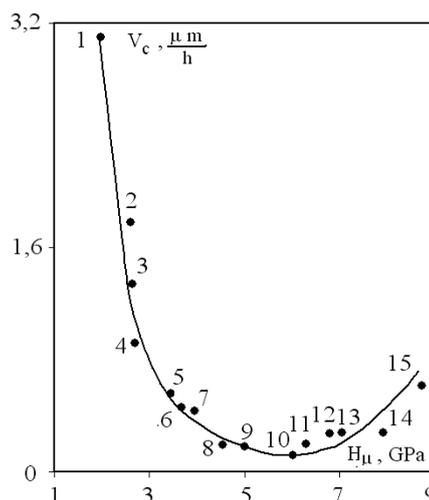


Рис. 2. Зависимость средней скорости эрозии образцов (V_c , мкм/ч) от H_{μ} при воздействии кавитации. Цифры, обозначающие экспериментальные данные, соответствуют номерам образцов в таблице

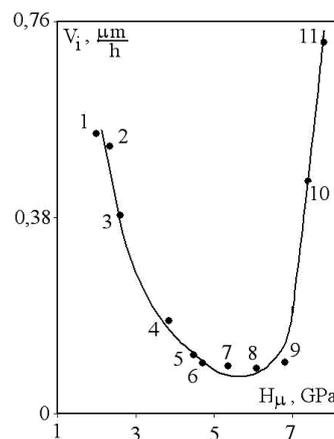


Рис. 3. Зависимость средней скорости распыления образцов (V_i , мкм/ч) от H_{μ} при облучении потоками ионов аргона. Экспериментальные данные обозначены точками с цифрами. Каждой цифре соответствует номер исследованного образца в таблице, указанный ниже:

- 1 – №1; 2 – №4; 3 – №2; 4 – №7; 5 – №9; 6 – №16;
 7 – №17; 8 – №13; 9 – №12; 10 – №14 (после плазменной обработки); 11 – №14

Данные рис. 2, 3 показывают, что характер зависимости V_c , V_i от H_{μ} подобен и может быть описан аналитическим соотношением вида $V_{c,i} = \alpha H_{\mu}^{-n}$, где α и n различны при кавитационном и ионном нагружении поверхности. С использованием метода и данных работ [3, 4] для кавитационного воздействия получено соотношение следующего вида: $V_c = 47,6 \cdot H_{\mu}^{-3,6}$. Соотношение справедливо для левой ветви каждой из кривых до значений микротвердости в интервале (6 ± 1) ГПа, при которых скорости эрозии минимальны. Эти значения микротвердости соответствуют многокомпонентным аморфным материалам. У монокристаллов с ОЦК-решеткой минимальную скорость эрозии имеет плоскость (111). Поликристаллические материалы

разрушаются с различными скоростями в зависимости от состава, структуры, размеров кристаллитов и межкристаллитных прослоек, что определяется технологией их производства и не всегда достаточно точно фиксируется. Наличие правой ветви кривых (см. рис. 2 и 3) свидетельствует о потере материалами пластичности.

ВЫВОДЫ

Установлено, что создаваемое кавитацией и потоком ионов аргона микроударное воздействие на поверхностные слои Mo, W, аморфных сплавов приводит к их эрозии со скоростями, зависящими от микротвердости (H_{μ}) образцов. Характер зависимости подобен для обоих видов нагружения, несмотря на различие в факторе воздействия. Зависимость от H_{μ} в интервале значений 1,5...7 ГПа может быть представлена для обоих видов воздействия соотношением вида $V = \alpha H^n$ с численно несколько различными значениями α и n . Минимальные значения скоростей эрозии наблюдаются для образцов с $H_{\mu} \sim 6...7$ ГПа (аморфные металлические сплавы). Для образцов с $H_{\mu} > 7$ ГПа скорость эрозии возрастает,

что, очевидно, обусловлено снижением их пластичности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. В.С. Войценья, В.Г. Коновалов, С.И. Солодовченко, А.Н. Шаповал, А.Ф. Штань. Очистка поверхности медных зеркал в водородной плазме // *Материалы конференции «Физика и техника плазмы»*. 13–15 сентября 1994 г., Минск, Беларусь, т. 2, с. 369-372.
2. В.І. Коваленко, В.Г. Маринін. Обладнання для дослідження ерозії покриттів при мікроударному діянні // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 1998, №5(71), с. 83-85.
3. А. Уорсинг, Дж. Геффнер. *Методы обработки экспериментальных данных*. М.: Изд-во иностр. лит., 1953, 346 с.
4. В.Г. Маринін. *Ерозія технічно чистих металів при кавітації*: Препринт ХФТІ 2011-1. Харків: ННЦ ХФТІ, 2011, 44 с.

Статья поступила в редакцию 21.08.2018 г.

ЕРОЗИЯ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ МЕТАЛЕВИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ МІКРОУДАРНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

В.С. Войценья, В.І. Коваленко, В.Г. Маринін, Л.І. Мартиненко, С.І. Солодовченко

Отримано дані про густину, микротвердість, структуру, середню швидкість ерозії поверхневих шарів монокристалів, полікристалів Mo, W, аморфних сплавів на основі Zr, W при дії на них кавітації та іонів аргону. Установлено залежність швидкостей ерозії зразків від їхньої микротвердості (H_{μ}). В інтервалі значень H_{μ} від 1,5 до 6...7 ГПа швидкості ерозії змінюються для обох видів навантаження подібним чином пропорційно H_{μ}^{-n} , де, зокрема, для кавітаційного впливу $n \cong 3,6$. Мінімальні значення швидкостей ерозії мають аморфні сплави. Для зразків з $H_{\mu} > 7$ ГПа швидкості ерозії зростають, що обумовлено зменшенням пластичності матеріалів.

EROSION OF SUPERFICIAL LAYERS OF METALLIC MATERIALS AT MICROSHOCK LADENING

V.S. Voitsenya, V.I. Kovalenko, V.G. Marinin, L.I. Martynenko, S.I. Solodovchenko

The data were obtained on the density, microhardness, structure, average destruction rate of the surface layers of Mo and W monocrystals, a few amorphous Zr-based and W-based alloys subjected to cavitation and sputtering with argon ions. The dependence of the destruction rates of samples on their microhardness H_{μ} has been established. It was found that in the range of H_{μ} from 1.5 to 6...7 GPa, the rates of fracture change for both types of loading in a similar way proportional to H_{μ}^{-n} , where for the cavitation effect $n \cong 3.6$. The minimum values of fracture rates are for amorphous alloys. For samples with $H_{\mu} > 7$ GPa, the rate of failure increases, what is due to a decrease in the ductility of the materials.