

тов с учетом различия в теплопроводности поликристалла и монокристалла UO_2 [16] представлены в таблице.

Авторы выражают благодарность Ю. Н. Сокурскому за помощь в подготовке статьи и за полезные замечания, высказанные при обсуждении результатов.

Поступила в Редакцию 7/1 1976 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Brucklacher D., Dienst W. «J. Nucl. Mater.», 1972, v. 42, p. 285.
2. Nabarro F. In: Proc. Bristol conference on Strenth of Solids. London, the Physical Societi, 1948, p. 75.
3. Soloman A. «J. Amer. Ceram. Soc.», 1973, v. 56, N 3, p. 170.
4. Brinkman J., Wiedersich H. American Society for Testing and Materials Special Technical Publication, 1965, N380, p. 3.
5. Nichols F. «J. Nucl. Mater.», 1969, v. 30, p. 249.
6. Гильберт Е. Р. Радиационная ползучесть реакторных материалов. Технология реакторов. Вып. 3. М., ЦНИИАтоминформ, 1972.
7. Канн Р. Физическое металловедение. Вып. 3. М., «Мир», 1968.
8. Конобеевский С. Т. Действие облучения на материалы. М., Атомиздат, 1967.
9. Perrin J. «J. Nucl. Mater.», [1], p. 104.
10. Perrin J. «J. Nucl. Mater.», 1971, N 39, p. 475.
11. Гарофалло Ф. Законы ползучести и длительной прочности для металлов и сплавов. М., «Металлургия», 1968.
12. Brucklacher D., Dients W. In: Proc. IAEA Symp. «Fuel and Fuel Elements for Fast Reactors», 2—6 July 1973, Brussel, Rep. N 31.
13. Glough D. In: Proc. IAEA Symp. «Fast Reactor Fuel and Fuel Elements», Karlsruhe, 28—30 Sept. 1970, Rep. N 6.
14. Милосердин Ю. В. и др. «Атомная энергия», 1973, т. 35, вып. 6, с. 371.
15. Li J. «Acta metallurgica», 1963, v. 11, p. 1269.
16. Daniel J. In: Proc. conf. «Thermal conductivity of UO_2 ». Sept. 1962, HW-69945.
17. Glough D. «J. Nucl. Mater.», 1975, v. 56, N 3, p. 279.

УДК 533.924:539.12.17

Температурная зависимость эрозии сплавов ванадия и ниобия при облучении ионами гелия

КАЛИН Б. А., КИРИЛИН Н. М., ПИСАРЕВ А. А., СКОРОВ Д. М., ТЕЛЬКОВСКИЙ В. Г., ШИШКИН Г. Н.

Один из основных процессов, приводящих к разрушению первой стенки термоядерных установок, — вспучивание поверхности материала (блистеринг), которое обусловлено объединением газовых полостей, образовавшихся непосредственно под поверхность при ионной бомбардировке [1]. После двадцатилетней эксплуатации термоядерных установок коэффициент эрозии вследствие блистеринга не должен превышать 10^{-2} атом·ион⁻¹ при потоке ионов на стенку, равным $3 \cdot 10^{19}$ ион·м⁻²·с⁻¹ [2]. Поэтому возникает необходимость выбора материалов, стойких при облучении легкими ионами.

В настоящее время перспективными материалами первой стенки являются ванадиевые, нио-

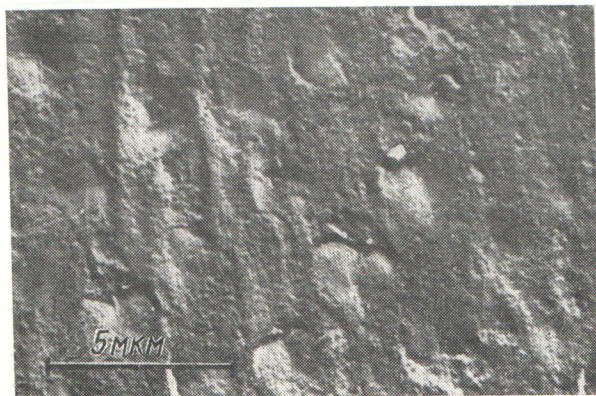
биевые и молибденовые сплавы [1], а также нержавеющая сталь, однако поведение этих сплавов при облучении ионами гелия и изотопов водорода пока недостаточно изучено [3, 4].

Цель настоящей работы — изучение температурной зависимости коэффициента эрозии ванадия электронно-лучевой плавки, сплава $V + 2,5\% \text{ Zr} + \text{C}$ и ниобиевых сплавов $\text{Nb} + 4,2\% \text{ Mo} + 0,8\% \text{ Zr}$, $\text{Nb} + 1,1\% \text{ Zr} + \text{C}$ в результате вспучивания при облучении ионами гелия с энергией 20 кэВ в широком интервале температур 300—1400 К и доз (1—50) 10^{21} ион·м⁻².

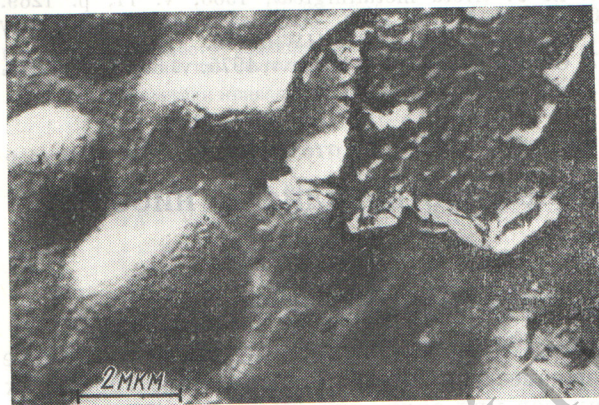
Методика эксперимента. Образцы для облучения были приготовлены электрополировкой

Состав исследованных материалов

Номер сплава	Состав сплава	Элемент													
		Nb	Zr	Mo	V	Al	Fe	Ni	Y	Si	S	C	O ₂	N ₂	H ₂
1	V	—	—	—	99,90	0,01	0,05	0,01	—	0,01	0,005	0,02	—	—	—
2	V + 2,5 % Zr + C	—	2,50	—	97,07	—	—	—	0,01	—	—	0,40	0,12	—	—
3	Nb + 4,2 % Mo + 0,8 % Zr	94,73	0,76	4,20	—	—	0,10	0,10	—	0,03	—	0,02	0,02	0,03	0,008
4	Nb + 1,1 % Zr + C	98,80	1,10	—	—	—	—	0,011	—	—	—	0,12	0,01	—	0,001



а



б

Р и с. 1. Вспучивание сплава Nb + 1,1% Zr + С (а) и ванадия (б), облученных ионами гелия дозой $7,8 \cdot 10^{21}$ и $1 \cdot 10^{22}$ ион \cdot м² при 800 К

из прокатанной фольги толщиной $1 \cdot 10^{-4}$ м. Состав исследуемых материалов представлен в табл. 1. Облучение ионами гелия осуществлялось в масс-монохроматоре с двойной фокусировкой при условиях, описанных в работе [3]. Исследование характера разрушения поверхности после облучения проводилось на электронном микроскопе УЭМВ-400К методом одноступенчатых угольных реплик. Коэффициент эрозии определялся по электронно-микроскопическим снимкам путем измерения геометрических размеров разрушенных блистеров и подсчета числа атомов в отщепленных куполах, т. е.

$$N = N_A \frac{\rho V}{A},$$

где N — число отщепленных атомов сплава; N_A — число Авогадро; ρ — плотность сплава; V — объем отщепленных куполов; A — средняя атомная масса сплава.

Общая погрешность при определении коэффициента эрозии не превышала 50%.

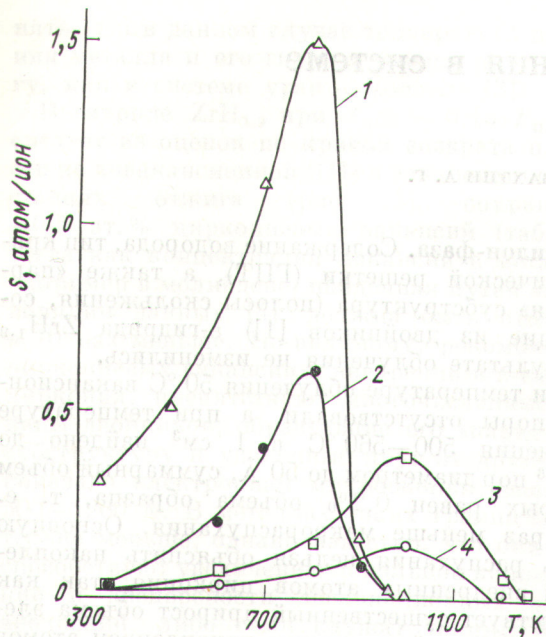
Результаты и их обсуждение. Исследование характера разрушения образцов показало, что существует зависимость эрозии поверхности от дозы облучения. Для всех сплавов при дозе облучения до $6 \cdot 10^{21}$ ион \cdot м⁻² характерно куполообразное вспучивание поверхности без разрушения куполов. С ростом дозы облучения до $1 \cdot 10^{22}$ ион \cdot м⁻² увеличивается плотность блистеров и происходит частичный отрыв куполов вздутый (рис. 1, а). При дозе, равной или выше $1 \cdot 10^{22}$ ион \cdot м⁻², усиливается эрозия поверхности (рис. 1, б), появляются блистеры второго поколения (рис. 2), происходит разрушение и отщепление куполов, однако коэффициент эрозии материалов возрастает незначительно и в пределах погрешностей измерений для различных доз облучения совпадает.

Зависимость эрозии материалов от температуры облучения проявилась для всех исследованных сплавов (рис. 3), откуда видно, что она носит экстремальный характер, максимальный коэффициент эрозии наблюдался при 800 и 1000 К для ванадиевых и ниобиевых сплавов соответственно.

Для сплавов ванадия и ниобия определена температура 1000 и 1300 К соответственно, выше которой поверхность материалов вспучиванием не разрушается (рис. 4). Однако ниже этой температуры (вплоть до комнатной) поверхность материала интенсивно разрушается, причем коэффициент эрозии вследствие блистеринга на несколько порядков выше, чем при физическом распылении, данные для которого представлены в работе [1].



Р и с. 2. Эрозия ванадия, облученного дозой $3,0 \cdot 10^{22}$ ион \cdot м⁻² при 800 К

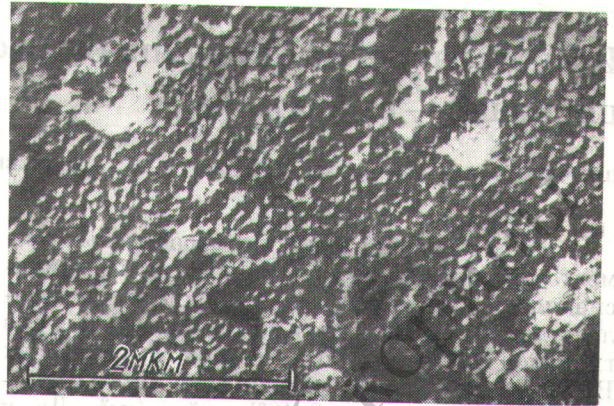


Р и с. 3. Зависимость коэффициента эрозии ниобиевых и ванадиевых сплавов от температуры облучения (цифры у кривых — номера сплавов в таблице)

Зависимость коэффициента эрозии для сплавов ванадия можно объяснить, исходя из экспериментов по выделению гелия из ванадия [5] и из температурной зависимости прочностных характеристик ванадиевых сплавов. Действительно, при увеличении температуры облучения (при прочих равных условиях) понижается предел прочности сплавов и повышается давление газа в блистерах, что способствует разрушению поверхностного слоя и эрозии материалов.

При дальнейшем увеличении температуры (свыше 800 К) стимулируется диффузия гелия по различным вакансионным механизмам и возрастает вероятность его выхода на поверхность материала, к границам зерен и к дисперсионным частицам второй фазы. Поэтому доля газа, участвующая в образовании вздутий, уменьшается с ростом температуры.

Подобным образом можно объяснить температурную зависимость коэффициента эрозии для ниобиевых сплавов. При этом нужно отметить два фактора: во-первых, диффузионные процессы (при прочих равных условиях) в этих сплавах протекают при более высокой температуре, чем в ванадиевых [6]; во-вторых, существенное изменение прочностных свойств ниобиевых сплавов наблюдается при более высокой температуре. За счет данных процессов, по-видимо-



Р и с. 4. Поверхность сплава $Nb + 4,2\% Mo + 0,8\% Zr$, облученного ионами гелия дозой $1,6 \cdot 10^{22}$ ион·м⁻² при 1230 К

му, происходит сдвиг максимума эрозии ниобиевых сплавов в высокотемпературную область (~1000 К).

Таким образом, сплавы ванадия и ниобия, легированные цирконием и углеродом, проявили большую стойкость к блистерообразованию при 900—1100 и 1200—1400 К соответственно. В этом интервале сплавы имеют минимум SZ , где S — коэффициент эрозии; Z — атомный номер элемента. Следовательно, сплавы могут вызвать минимум потерь энергии плазмы, которые [7] пропорциональны квадрату атомного номера присутствующей в ней примеси.

Выводы.

Установлено, что максимальная эрозия ванадия и его сплавов наблюдается при 700—900 К, а ниобиевых сплавов — при 900—1100 К. Максимальное значение коэффициентов эрозии сплавов для ванадия и сплавов $V + 25\% Zr + C$; $Nb + 4,2\% Mo + Zr$; $Nb + 1,1\% Zr + C$ составляет $1,5 \pm 0,7$; $0,6 \pm 0,3$; $0,4 \pm 0,2$; $0,15 \pm 0,07$ соответственно.

Поступила в Редакцию 29/III 1976 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kulcinski G., Emmert G. «J. Nucl. Mater.», 1974, v. 53, N 1, p. 31.
2. Lagreid N., Dahlgger S. «J. Appl. Phys.», 1973, v. 44, N 3, p. 2093.
3. Калинин Б. А. и др. «Атомная энергия», 1975, т. 39, вып. 2, с. 126.
4. Kalin B. Proc. 12 Intern. Conf. on Phenomena in Ionized Cases. P. 1. North-Holland, American Elsevier, 1975, p. 241.
5. Bauer W., Thomas G. «J. Nucl. Mater.», 1974, v. 53, N 1, p. 127.
6. Писарев А. А., Тельковский В. Г. «Атомная энергия», 1975, т. 38, вып. 3, с. 152.
7. Meade D. «Nucl. Fusion», 1974, v. 14, N 2, p. 289.