

04; 05

© 1991 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПЫЛЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ТЕРМОЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ С ПОМОЩЬЮ ГАЗОРАЗРЯДНОЙ РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ КАМЕРЫ

В. В. Дунаев, А. Г. Жиглинский, В. В. Кучинский, Г. Л. Саксаганский,
П. А. Фефелов, Э. Н. Фафурина

Приведены результаты исследования эрозии 19 конструкционных материалов. Эти данные (вместе с результатами других исследований) позволяют выбирать оптимально материалы конструкционных элементов ТЯР. Полученные значения селективных коэффициентов распыления позволяют рассчитывать изменение во времени состава приповерхностных слоев и селективных коэффициентов распыления компонентов материалов ТЯР, выбирать оптимальные с точки зрения эрозионных характеристик режимы эксплуатации реакторов, оценивать время, за которое первая стенка выходит в стационарный режим распыления.

В нашей предыдущей работе [1] показано, каким образом удалось преодолеть трудности, стоящие на пути использования газоразрядной распылительной камеры для проведения модельных экспериментов по определению эрозионных свойств конструкционных материалов ТЯР. Целью данной работы являются изложение и обсуждение экспериментальных результатов, полученных с помощью газоразрядной распылительной камеры.

За последние годы с помощью газоразрядной распылительной камеры изучены эрозионные характеристики широкого класса металлов, сплавов, покрытий, композиционных материалов (в том числе углеродных), нержавеющей сталей, жаропрочных сплавов и т. д. Установка, на которой проведены измерения селективных коэффициентов распыления, описана в работах [1, 2].

Рассмотрим вначале измерение селективных и суммарных коэффициентов распыления молибден-ванадиевого Мо4604, молибден-ренийевого МП47ВП и вольфрам-ренийевого ВР27ВП сплавов. В настоящее время планируется применение этих сплавов в качестве высоковольтных электродов ионно-оптической системы и экранов газоразрядной камеры источников мегаваттных пучков ионов водорода. Кроме того, они представляют интерес в качестве конструкционного материала приемных диверторных пластин.

До запуска рабочего газа (гелия) газоразрядная распылительная камера откачивалась до давления 10^{-6} Па. Рабочее давление газа менялось в пределах

Таблица 1

Селективные коэффициенты распыления компонентов сплавов на молибденовой,
вольфрам-ренийевой и молибден-ренийевой основе

Материал	Компонент	S_k	$(S_k)_{100\%}$	$S_k z_k^2$	ΣS_k	$\Sigma S_k z_k^2$	Энергия ионов, эВ	Доза 10^{20} см $^{-2}$	Носитель разряда
MP47ВП	Re	0.0035	0.011	19	0.030	67	300	3	He
	Mo	0.0270	0.039	48					
Mo4604	Mo	0.0250	0.025	44	0.025	44	300	1	He
BP27ВП	W	0.0080	0.011	44	0.011	61	300	1	He
	Re	0.0030	0.011	17					

130—550 Па, плотность ионного тока на образец площадью 30 см² была порядка 1 мА/см², доза ионного облучения порядка 10²⁰ см⁻². Результаты измерений абсолютных коэффициентов селективного распыления (при энергии ионов 300 эВ) сплавов на основе молибдена, вольфрама и рения приведены в табл. 1 и 2. Помимо селективных коэффициентов распыления мы приводим в таблицах величины коэффициентов распыления, приведенные к 100 % содержания компонента в сплаве ($S_k)_{100\%} = S_k / \rho_{ок}$ (где $\rho_{ок}$ — атомная концентрация компонента в исходном материале). Приведенные в табл. 1 значения $S_k z_k^2$ позволяют оценить относительный вклад каждого компонента сплава в радиационные потери высокотемпературной плазмы, а величина $\Sigma S_k z_k^2$ — суммарный вклад компонентов материала. В табл. 1 даны также суммарные коэффициенты распыления ΣS_k . Из сопоставления этих величин видно, что суммарные коэффициенты распыления для сплавов МР47ВП и Мо4604 в 2—3 раза выше, чем вольфрамо-рениевого сплава ВР27ВП, однако за счет меньшего заряда ядра молибдена следует ожидать, что радиационные потери, вносимые при распылении материала Мо4604 в плазму, будут в 1.5 раза меньше, чем других материалов, приведенных в табл. 1.

Если сравнить результаты измерений в плазме с немногочисленными данными по определению коэффициентов распыления чистых материалов ионными пучками, то для коэффициента распыления Мо в работе [3] приведено значение 0.020 ± 0.005 ат./ион, что близко к результату для сплава Мо4604 (табл. 1). Сравнение же коэффициента $S_k = 0.011$ для W (табл. 1) с данными работы [4] ($S_k = 0.004$) позволяет предположить, что их отличие (в 3 раза) связано с худшими, чем у нас, вакуумными условиями (натекание в процессе распыления достигало в этой работе $4 \cdot 10^{-4}$ Па). Для проверки этого объяснения расхождений были проведены измерения при остаточном давлении 10^{-3} Па (табл. 2). Как видно, эрозия вольфрама в условиях худшего вакуума действительно уменьшается примерно в 3 раза. Селективные коэффициенты распыления молибдена уменьшились в 20—30 раз, рения — в 5—10 раз. Такая сильная зависимость коэффициента распыления от вакуумной гигиены для этих элементов может быть следствием двух причин.

1. Присутствие кислорода способствует образованию окисных слоев на поверхности, затрудняющих процесс распыления. Так, согласно работам [5, 6], изменение остаточного давления кислорода в распылительной камере от 10^{-6} до 10^{-3} Па приводит к уменьшению коэффициента распыления поверхности от 4 до 10 раз.

2. Из-за остаточного давления воздуха в плазме присутствует, кроме кислорода, азот (на уровне 10^{-3} — 10^{-4} Па), а также из-за применения паромасляной откачки пары масла (и, следовательно, водород). Как известно [5], при взаимодействии переходных металлов с Н, В, С, N образуются соединения, называемые «сплавами внедрения», которые отличаются большой твердостью и высокими температурами плавления. Причем полагают [5], что высокая твердость сплавов внедрения обусловлена наличием прочных направленных связей. Поэтому вероятной причиной уменьшения коэффициентов распыления Мо, W, Re на установке с паромасляной откачкой можно предположить также образование в приповерхностных слоях исследуемых материалов соединений типа сплавов внедрения.

Заметим, что в случае фоновго давления 10^{-3} Па результат для W, полученный в плазме, согласуется с приведенными выше результатами работы [4], полученными также при большом фоновом давлении.

Таблица 2

Значения селективных коэффициентов распыления компонентов сплавов на молибденовой, вольфрамо-рениевой и молибдено-рениевой основе при различных давлениях остаточного газа (энергия ионов He 300 эВ)

Материал	Компонент	S_k	
		10^{-6} Па	10^{-3} Па
МР47ВП	Mo (69 %)	0.027	0.0012
	Re (31 %)	0.0035	0.00062
Мо4604	Mo (99 %)	0.025	0.00085
ВР27ВП	W (73 %)	0.0080	0.0029
	Re (27 %)	0.0030	0.00031

Таблица 3

Селективные коэффициенты распыления чистых металлов, сплавов на титановой, никелевой и железоникелевой основе и нержавеющей стали при энергии ионов 500 эВ

Материал	Компонент	S_k	$(S_k)_{100\%}$	$S_k z_k^2$	ΣS_k	$\Sigma S_k z_k^2$	Доза 10^{20} см ⁻²	Носитель разряда
Ti	Ti	0.006	0.006	2.9	0.006	2.9	1	D ₂
ПТ-3В	Ti	0.006	0.006	2.9	0.006	2.9	1	D ₂
ПТ-7М	Ti	0.020	0.020	9.7	0.020	9.7	1	D ₂
Fe	Fe	0.080	0.080	54	0.080	54	1	D ₂
Ni	Ni	0.080	0.080	63	0.080	63	1	D ₂
X18H10T	Ni	0.008	0.080	6.3	0.078	52	2	D ₂
	Cr	0.015	0.080	8.5				
	Fe	0.355	0.080	37				
XH38BT	Ni	0.025	0.070	20	0.080	56	2	D ₂
	Cr	0.020	0.095	12				
	Fe	0.035	0.090	24				
XH70Ю	Ni	0.015	0.020	12	0.021	15	2	D ₂
	Cr	0.006	0.020	3				
XH78T	Ni	0.020	0.025	16	0.025	19	2	D ₂
	Cr	0.005	0.025	3				
XH75МБТЮ	Ni	0.030	0.040	24	0.036	28	2	D ₂
	Cr	0.006	0.030	4				
XH75МБТЮ	Ni	0.050	0.070	39	0.070	51	2	He
	Cr	0.020	0.095	12				

Из сказанного выше ясно, что данные, полученные в условиях разной вакуумной гигиены, могут существенно отличаться друг от друга.

Перейдем теперь к изложению результатов определения коэффициентов селективного распыления различных материалов. Сводка результатов представлена в табл. 3—5.

Изучение эрозии чистых металлов, сплавов и нержавеющей сталей (табл. 3) проводилось при следующих условиях: концентрация рабочего газа — гелия или дейтерия 10^{16} см⁻³, плотность тока $10—40$, мА/см², энергия ионов около 500 эВ. Основная компонента ионного тока в разряде в дейтерии состояла из ионов D₃⁺. Зависимость коэффициента распыления от плотности тока не наблюдалась, что свидетельствует о достаточной чистоте исследуемой поверхности. Среднеквадратичная ошибка определения S_k не превосходила 20 % и была

Таблица 4

Селективные коэффициенты распыления углеродсодержащих материалов

Материал	Компонент	S_k	$(S_k)_{100\%}$	$S_k z_k^2$	ΣS_k	$\Sigma S_k z_k^2$	Энергия ионов, эВ	Доза 10^{20} см ⁻²	Носитель разряда
БСГ-30	C	0.040	0.050	1.4	0.062	5.3	500	22	D ₂
	Si	0.020	0.170	3.9					
	B	0.002	0.050	0.05					
УСБ-15	C	0.100	0.110	3.6	0.114	4.0	500	15	D ₂
	B	0.014	0.140	0.35					
БСГ-30	C	0.020	0.025	0.7	0.048	5.7	300	28	He
	Si	0.025	0.020	4.9					
	B	0.003	0.075	0.08					
УСБ-15	C	0.075	0.085	2.7	0.090	3.1	300	22	He
	B	0.015	0.150	0.38					
Графит CVDC (США)	C	0.100	0.100	3.6	0.100	3.6	300	2	He

Селективные коэффициенты распыления карбидных покрытий

Материал	Компонент	S_k	$(S_k)_{100\%}$	$S_k z_k^2$	ΣS_k	$\Sigma S_k z_k^2$	Энергия, эВ	Доза 10^{20} см ⁻²	Носитель разряда
TiC	Ti	0.005	0.010	2.4	0.014	2.7	500	5	H ₂
	C	0.009	0.018	0.3					
NbC	Nb	0.004	0.008	6.7	0.009	6.9	500	7	H ₂
	C	0.005	0.010	0.2					
TaC	Ta	0.002	0.004	11.0	0.005	11.1	500	26	H ₂
	C	0.003	0.006	0.1					
Графит CVDC (США)	C	0.100	0.010	3.6	0.010	3.6	500	2	H ₂

обусловлена в основном погрешностью спектроаналитического определения количества осевшего на зонде материала.

Приведенные в таблицах величины $(S_k)_{100\%}$ позволяют сравнить, насколько бы отличался коэффициент распыления компонента в разных материалах, если бы его концентрация в этих материалах была одна и та же (и составляла, например, 100 %). Из табл. 3 следует, что различие между селективными коэффициентами распыления компонентов, входящих в разные материалы, может быть обусловлено как различным его содержанием, так и структурой материала. При распылении в молекулярных газах мы будем приводить относительные коэффициенты распыления компонентов материала, а при распылении в атомарных — абсолютные.

Сравнение данных о распылении Ti и его сплавов в дейтерии с распылением других приведенных материалов позволяет заметить, что произведение $S_k z_k^2$, определяющее величину радиационных потерь в плазме, у Ti и его сплавов ПТ-3В, ПТ-7М минимально. Особенно малыми значениями параметра $S_k z_k^2$ отличаются чистый Ti и сплав ПТ-3В. Из табл. 3 следует, что коэффициенты распыления чистых металлов могут значительно отличаться от коэффициентов распыления этих же металлов в составе сплавов. Так, $(S_k)_{100\%}$ титана в сплаве ПТ-7М примерно в три раза больше, чем чистого титана, хотя в этом сплаве содержание титана составляет 95 %. Аналогично распыление никеля в сплаве ХН70Ю более чем в четыре раза уменьшается по сравнению с чистым никелем. С другой стороны, из табл. 3 следует, что близкие друг к другу коэффициенты распыления $(S_k)_{100\%}$ никеля и железа остаются близкими и при их распылении из сплавов. Из литературы известно, что мало отличаются также коэффициенты распыления чистых никеля и хрома. В изученных нами сплавах это равенство для $(S_k)_{100\%}$ также сохраняется. Отличие же S_k никеля и хрома объясняется их разными концентрациями в сплаве и не связано со структурой сплава. Таким образом, можно сделать вывод, что для исследованных сплавов при распылении в дейтерии абсолютные значения коэффициентов распыления элементов Fe, Ni, Cr в сплаве могут изменяться, а относительные величины $(S_k)_{100\%}$ сохраняются. По критерию радиационных потерь плазмы из рассмотренной в табл. 3 группы материалов сплавы на никелевой основе при распылении ионами низких энергий в дейтерии имеют преимущество по сравнению с нержавеющей сталью Х18Н10Т, сплавами на железоникелевой основе ХН38ВТ и ХН75МБТЮ.

Рассмотрим результаты определения селективных коэффициентов распыления S_k компонентов массивных углеродсодержащих материалов (боросилицированного графита БСГ-30, углеситалла УСБ-15, графита CVDC) [7-9]. В связи с тем, что при взаимодействии с плазмой происходит изменение свойств поверхности БСГ-30 и УСБ-15, а сами образцы не являются однородными, была исследована динамика распыления этих образцов. Для выхода в стационарный режим распыления углеситалла, который в исходном состоянии является менее неоднородным материалом, потребовалась доза ионного облучения 10^{21} см⁻², а при распылении БСГ-30 даже при дозе $3 \cdot 10^{21}$ см⁻² стационарного режима не наблюдалось.

В табл. 4 приведены значения S_k компонентов углесталла, измеренные в стационарном режиме, и значения S_k компонентов боросилицированного графита, усредненные по дозе облучения $3 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2}$.

Если говорить о радиационных потерях плазмы, то, поскольку коэффициент распыления углерода и кремния из боросилицированного графита примерно на порядок превышает S_k бора (табл. 4), радиационные потери высокотемпературной плазмы в результате распыления первой стенки из БСГ-30 будут определяться в основном распыленными атомами кремния (для него параметр $S_k z_k^2$ в несколько раз больше, чем для углерода, и почти на два порядка больше, чем для бора).

При распылении углесталла УСБ-15 коэффициент распыления углерода оказался в 5—7 раз выше, чем S_k бора (как в дейтериевой, так и в гелиевой плазме). Поэтому радиационные потери в плазме и уменьшение толщины стенки определяются распыленными атомами углерода (вклад атомов В на порядок меньше).

Сравнение интегральных коэффициентов распыления углесталла и боросилицированного графита показывает, что углесталл распыляется больше. Радиационные же потери, обусловленные распылением материалов в гелии, для боросилицированного графита в 2 раза больше, чем для углесталла.

Сравнение распыления стали X18H10T и углеродосодержащих материалов (УСБ-15, БСГ-30) показывает, что радиационные потери плазмы для стенки из стали на порядок выше аналогичных значений для углеродосодержащих материалов.

В табл. 5 приведены результаты измерения селективных коэффициентов распыления карбидов металлов NbC, TiC, TaC. Эти материалы также рассматриваются в качестве перспективных для создания конструктивных элементов ТЯР. Из данных, приведенных в табл. 5, следует, что, хотя коэффициенты распыления атомов металла и атомов углерода, как это и должно быть в стационарном режиме распыления (доза облучения составляла 10^{21} см^{-2}) при соизмеримых концентрациях этих элементов в материалах, оказываются близкими, основной вклад в радиационные потери в плазме будут вносить распыленные атомы металла. Параметр $S_k z_k^2$ возрастает с увеличением атомного номера металла (от TiC к TaC в 4 раза). Значения ΣS_k карбидных покрытий значительно меньше, чем для графита CVDC. Результаты исследования эрозии конструктивных материалов (в комплексе с результатами других исследований) позволяют обоснованно выбирать материалы конструктивных элементов ТЯР. Полученные значения S_k позволяют рассчитывать изменение во времени состава приповерхностных слоев и селективных коэффициентов распыления компонентов материалов ТЯР, выбирать оптимальные с точки зрения эрозионных характеристик режимы эксплуатации реакторов, оценивать время, за которое первая стенка выходит в стационарный режим распыления.

Список литературы

- [1] Жиглинский А. Г., Кучинский В. В., Саксаганский Г. Л. // ЖТФ. 1990. Т. 60. Вып. 12. С. 49—56.
- [2] Дричко Д. А., Дунаев В. В., Жиглинский А. Г. и др. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. 1987. № 2. С. 42—45.
- [3] Андерсен Х., Бай Х. // Распыление твердых тел ионной бомбардировкой / Под ред. Р. Бершна. М.: Мир, 1984. С. 194—230.
- [4] Roth J., Bohdansky J., Ottenberger W. Max-Planck-Institut for Plasmaphysik. Garching bei Munchen. IPP 9/26. 1979. 92 p.
- [5] Grischkowsky D., Yu M. L., Balant A. C. // Surf. Sci. 1983. Vol. 127. N 2. P. 315—330.
- [6] Berneim M., Slodziam G. // Int. J. Mass. Spektr. 1973. Vol. 12. N 1. P. 93—99.
- [7] Мазуль И. В., Саксаганский Г. Л., Жиглинский А. Г. и др. Препринт НИИЭФА. № П-А-0615. Л., 1983. 22 с.
- [8] Дунаев В. В., Измайлов А. М., Кучинский В. В. и др. // Поверхности. Физика, химия, механика. 1984. № 11. С. 41—47.
- [9] Володин А. А., Мазуль И. В., Дунаев В. В. и др. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. 1983. № 5 (28). С. 41—49.