

УДК 533.924

**ОБ ЭРОЗИИ ВАНАДИЯ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ С ПЛАЗМОЙ**

*А.В. Недоспасов, Н.М. Зыкова, Н.В. Ненова (Объединенный институт высоких температур РАН, Россия, 125412, г. Москва, Ижорская ул., д. 13/19)*

Приведены результаты экспериментальных и теоретических работ по эрозии ванадия под воздействием полностью ионизованной литиевой и дейтериевой плазмы, полученные сотрудниками Объединенного института высоких температур РАН. Рассмотрены эрозия ванадиевых электродов в сильноточных разрядах в парах лития, распыление ванадия в потоке дейтериевой плазмы, тепловая контракция на поверхности ванадия. Эти результаты дополняют обширный экспериментальный материал о воздействии потоков ионов и плазмы на поверхность образцов, изготовленных из ванадия и сплавов на его основе, ранее опубликованный в обзоре Н.П. Апаринной, М.И. Гусевой, Л.С. Данеляна и др. [1].

**Ключевые слова:** эрозия ванадия, распыление ванадия, сильноточный разряд в парах лития.

ON VANADIUM EROSION IN PLASMA EXPERIMENTS. A.V. NEDOSPASOV, N.M. ZYKOVA, N.V. NENOVA. The results of experimental and theoretical studies of vanadium erosion induced by a fully ionized lithium and deuterium plasma are reported. The studies were performed in the Joint Institute for High-Temperature Research at Russia's Academy of Sciences and addressed the erosion of vanadium electrodes in high-current discharges in lithium vapor, vanadium sputtering in a deuterium plasma flux and thermal contraction on a vanadium specimen surface. These results complement the extensive experimental data concerning the impact of ions and plasma on the surfaces of vanadium and vanadium alloy specimens, that were published earlier in the review by N.P. Aparina, M.I. Guseva, L.S. Danelyan et al. [1].

**Key words:** vanadium erosion, vanadium sputtering, high-current discharge in lithium vapor.

**ЭРОЗИЯ ВАНАДИЕВЫХ ЭЛЕКТРОДОВ В СИЛЬНОТОЧНЫХ РАЗРЯДАХ В ПАРАХ ЛИТИЯ**

Эксперименты по воздействию литиевой плазмы осуществлялись в разрядах, описанных в работах [2—5]. Полностью ионизованная литиевая плазма получалась в импульсных разрядах миллисекундной длительности с типичными параметрами: концентрация электронов порядка  $10^{15} \text{ см}^{-3}$ , температура 3—5 эВ. В разрядах регистрировалось излучение с длиной волны  $\lambda = 548,5 \text{ нм}$ , соответствующее переходу  $2p^3P_0 \rightarrow 2s^3S$  иона лития  $\text{Li}^+$ , энергия уровня  $2p$  — 61,28 эВ. Из-за эрозии электродов в плазме имелись также ионы ванадия.

Для получения полностью ионизованной плазмы в разряде использовались такие свойства лития, как низкая энергия ионизации атома лития (5,39 эВ) и рекордно высокая энергия возбуждения (59,02 эВ) и ионизации (75,6 эВ) гелийподобного иона  $\text{Li}^+$ . Разряды осуществлялись при непрерывной высоковакуумной откачке при заполнении трубки литиевой плазмой из специального импульсного источника. В работе [2] таким источником служил взрывающийся «мостик» из твердого лития. В работе [3] источником плазмы служили дуговые разряды на литиевом катоде. Продолжительность сильноточного самоподдерживающегося разряда намного превышала время инъекции лития в основной разрядный промежуток. При силе тока в несколько кА на 1 см столба разряда выделялась мощность 10—20 кВт. Ей соответствовал удельный поток энергии до 2 кВт на  $1 \text{ см}^2$  поверхности кварцевой трубки. Поток ионов на стенку был намного меньше потока их хаотического движения в объеме плазмы, что может быть объяснено пинчеванием разряда под действием магнитного поля тока. Оценки по известной формуле Беннета для пинчей дали удовлетворительное согласие с основными измеряемыми параметрами плазмы. Наблюдались колебания напряжения на разрядном промежутке с широким спектром пульсаций.

В экспериментах электроды (катод основного разряда и аноды) были изготовлены из мелкозернистого ванадия. В экспериментах, описанных в [2], аноды были изготовлены из сплошного материала. В работе [3] использовались также пористые электроды, изготовленные в Институте проблем материаловедения Национальной академии наук Украины, со следующими характеристиками: размер пор 35—45 мкм, общий объем пористости 45,2%, открытой пористости 32,4%. Эрозия сплошных электродов вызывалась оплавлением их поверхности и образованием капель со средним диаметром порядка 30 мкм при дисперсии 10 мкм [2]. Эрозия, определяемая по потере веса образцов после прохождения через анод в серии многократных разрядов суммарного заряда 500 Кл, была порядка  $10^{-3} \text{ г/Кл}$ .

Эрозия анодов из пористого ванадия оказалась совершенно иной [3]. Заметная эрозия образцов не была обнаружена после прохождения суммарного заряда более 1000 Кл. Наблюдалось только оплавление вершин гранул на пористой поверхности (при большей плотности тока, чем в [2]). То обстоятельство, что эрозия пористого анода оказалась, по крайней мере, на три порядка меньше, чем эрозия анода из сплошного материала,

ла, связано с невозможностью появления на ней сплошной жидкой пленки, движение которой и приводит к образованию капель. Подавление капельной эрозии за счёт нарушения сплошности жидкой пленки было позднее подтверждено в экспериментах с плавлением вольфрамовых образцов в токамаке TEXTOR [6]. Эрозия катодов из пористого ванадия при прохождении заряда 1000 Кл оказалась на уровне  $(2,4—3)10^{-5}$  г/Кл.

## РАСПЫЛЕНИЕ ВАНАДИЯ В ПОТОКЕ ДЕЙТЕРИЕВОЙ ПЛАЗМЫ

Отсутствие заметной эрозии ванадиевых образцов при импульсных разрядах в литиевой плазме позволило установить образец из пористого ванадия на тест-лимитере токамака TEXTOR и измерить коэффициент распыления ванадия в дейтериевой плазме. Эксперименты проводились в токамаке TEXTOR-94 с большим радиусом 1,75 м и малым радиусом 0,46 м, с тороидальным магнитным полем 2,25 Тл и плазменным током 350 кА. Производился дополнительный нагрев плазмы с мощностью 1,3 МВт пучком нейтралов.

Образец из пористого ванадия диаметром 20 мм был вмонтирован в графитовый тест-лимитер на расстоянии 20 мм от его верхнего края со стороны ионного дрейфа, в области максимального энерговыделения. Тест-лимитер с основанием 120×80 мм с вершиной сферической формы радиусом 70 мм вводился в установку сверху в тень основного тороидального лимитера ( $r = 0,46$  м) и был расположен на малом радиусе  $r = 0,48$  м. Температура поверхности ванадиевого образца в этих экспериментах не измерялась. Температура вольфрамового образца при  $r = 0,48$  м в аналогичных разрядах была 600 °С. В экспериментах средняя по диаметру плотность электронов основной плазмы варьировалась в пределах от  $1,5 \cdot 10^{19}$  до  $6 \cdot 10^{19}$  м<sup>-3</sup>. Этому интервалу плотностей соответствовала температура плазмы, измеренная на радиусе 0,46 м, в интервале 90—25 эВ.

**Методика определения коэффициента распыления.** Относительный коэффициент распыления находился по измерениям спектров излучения плазмы в интервале длин волн 409—436 нм с помощью CCD-камеры с усилителем изображения. Входная щель спектрометра была ориентирована по малому радиусу и сцентрирована на образце. Типичный спектр излучения плазмы перед тест-лимитером по лучу зрения показан на рис. 1. Для измерения потока атомов ванадия с поверхности была выбрана линия VI с длиной волны 411,8 нм. Для нее число ионизаций, приходящихся на один излученный фотон, рассчитывалось по сечению возбуждения электронным ударом [7] и сечению ионизации [8]. При вычислении скорости ионизации в литературе существует неопределенность [9]. Вычисленное количество ионизаций на фотон слабо зависит от температуры электронов и равно 60.

**Результаты измерений.** Зависимость измеренных относительных потоков ванадия и углерода с поверхности от средней плотности основной плазмы показана на рис. 2. Величины потоков определялись по используемым на TEXTOR методикам. Как видно на рис. 2, коэффициент распыления

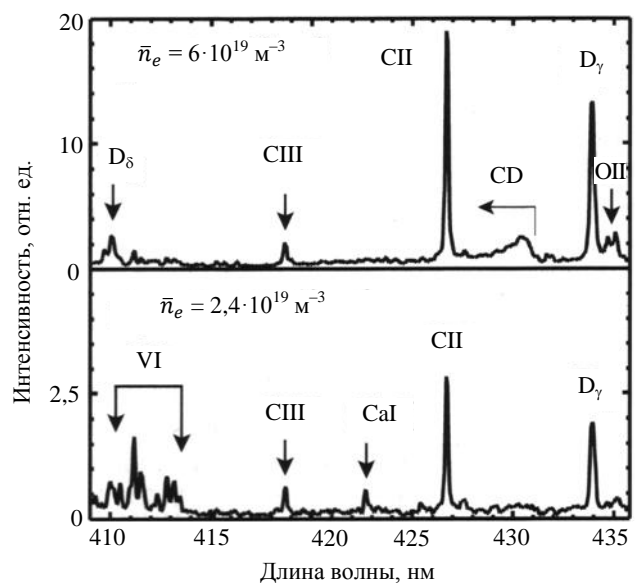


Рис. 1. Спектр плазмы вблизи образца из ванадия при двух различных плотностях плазмы

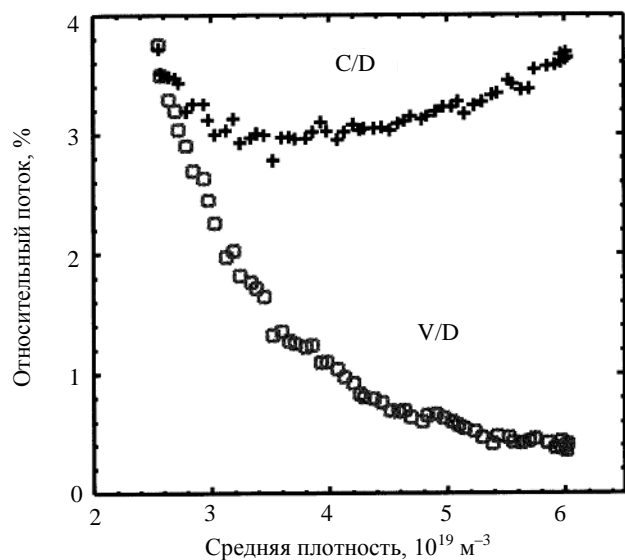


Рис. 2. Зависимость измеренных относительных потоков ванадия и углерода с поверхности от средней плотности основной плазмы

ванадия дейтерием, т.е. отношение потоков атомов ванадия и дейтерия, уменьшается от 3,8 до 0,4% при увеличении средней плотности плазмы. Для сравнения отметим, что коэффициент распыления вольфрама, измеренный на образце, расположенном при  $r = 0,46$  м (вблизи последней замкнутой магнитной поверхности), в аналогичных экспериментах изменялся от 3 до 0,6% [10]. Зависимость коэффициента распыления углерода от плотности основной плазмы, показанная на рис. 2, обсуждается в работе [3].

### ТЕПЛОВАЯ КОНТРАКЦИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ВАНАДИЯ

При взаимодействии горячей плазмы с поверхностью может возникать неустойчивость теплообмена из-за термоэлектронной эмиссии [11]. Такая неустойчивость на углеродной поверхности наблюдалась в работе [12]. При развитии неустойчивости возможно появление горячих пятен, сильно испаряющих материал стенок. В работе [13] приведены результаты расчетов критических параметров для возникнове-

**Критические плотность потока и температура плазмы, при которых образуются горячие пятна**

Материал	$q_c^0$ , кВт/см <sup>2</sup>	$T_s$ , эВ
Ванадий	3,4	146
Вольфрам	6,8	289

ния неустойчивости и параметров горячих пятен, возникающих на поверхностях из углерода, ванадия и вольфрама. Сравнительные расчеты проводились для модельной геометрии стенок, рассмотренной в работе [14]. Вычислялись критическая плотность потока тепла на стенку  $q_c^0$  и критическая температура плазмы  $T_s$ , при которых образуются горячие пятна. Пример расчета приведен в таблице.

По сравнению с углеродной поверхностью появление горячих пятен на ванадии и вольфраме затруднено из-за их относительно высокой теплопроводности. Поэтому горячие пятна на поверхностях из вольфрама и ванадия могут возникать только при срывах тока. При температуре пристеночной плазмы 180 эВ рассчитанный поток атомов ванадия, поступающих из пятна в плазму, равен  $3,0 \cdot 10^{20}$  частиц в секунду, при температуре плазмы 400 эВ поток атомов вольфрама, поступающих из пятна в плазму, равен  $7,5 \cdot 10^{15}$  частиц в секунду. Видно, что в случае появления горячих пятен эрозия ванадиевой поверхности за счет сильного испарения оказывается почти на пять порядков больше, чем вольфрамовой.

### REFERENCES

1. Aparina N.P., Guseva M.I., Danelyan L.S. et al. — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2008, issue 3, p. 68 (in Russian).
2. Nedospasov A.V., Sergienko G.V., Zykova N.M. et al. — J. Nucl. Mater., 1999, vol. 266—269, p. 618.
3. Zhmendak A.V., Huber A., Kvitsinskiy V.A. et al. — J. Nucl. Mater., 2001, vol. 290—293, p. 220.
4. Nedospasov A.V., Mudretskaya E.V., Zhmendak A.V. — Reports of the Academy of Sciences, 2000, vol. 374, p. 754 (in Russian).
5. Kvitsinskiy V.A., Mudretskaya E.V., Pavlov S.N., Perevoznikov S.A. — Fizika plazmy (Plasma Physics), 2001, vol. 27, p. 1 (in Russian).
6. Sergienko G., Bazylev B., Hirai T. et al. — Phys. Scr., 2007, № T128, p. 81.
7. Melnikov V.V., Smirnov Yu. M. — Opt. Spectrosc., 1983, vol. 53, c. 15.
8. Higgins M.J., Lennon M.A., Hughes J.G. et al. — Culham Report, UKAEA-CLM-R294, Abingdon, Oxfordshire, UK, 1989.
9. Voronov G.S. — At. Data Nucl. Data Tables 65, 1997, p. 1.
10. Sergienko G.V., Nedospasov A.V., Zykova N.M. — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2007, issue 3, p. 10 (in Russian).
11. Nedospasov A.V., Petrov V.G. — Reports of the USSR Academy of Sciences, 1983, vol. 269, issue 3, p. 603 (in Russian).
12. Philipps V., Samm U., Tokar M.Z. et al. — Nucl. Fusion, 1993, vol. 33, p. 953.
13. Nedospasov A.V., Bezlyudny I.V. — Contrib. Plasma Phys., 1998, vol. 38, № 1/2, p. 337.
14. Tokar' M.Z., Nedospasov A.V., Yarochkin A.V. — Nucl. Fusion, 1992, vol. 32, p. 15.

### AUTHORS

**Nedospasov A.V.** Joint Institute for High Temperatures of RAS, ul. Izhorskaya 13/19, 125412 Moscow, Russia; a-nedospasov@yandex.ru  
**Zykova N.M.** Joint Institute for High Temperatures of RAS, ul. Izhorskaya 13/19, 125412 Moscow, Russia  
**Nenova N.V.** Joint Institute for High Temperatures of RAS, ul. Izhorskaya 13/19, 125412 Moscow, Russia

Received 29 December 2008  
Problems of Atomic Science and Technology  
Ser. Thermonuclear Fusion, 2009, issue 1, pp. 50—52.