

УДК 533.924

МОРФОЛОГИЯ И СОСТАВ ПЫЛИ И КРУПНЫХ ЧАСТИЦ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ В ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М

Р.Х. Залавутдинов, А.Е. Городецкий, А.П. Захаров (Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, Москва, Россия), В.К. Гусев, А.Н. Новохацкий (Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия)

Методами растровой электронной микроскопии, рентгеноспектрального микроанализа и рентгенографии изучены морфология, элементный состав и структура облицовочных графитовых (марка РГТ-91) плиток, пыли и крупных частиц, появившихся в результате эксплуатации токамака Глобус-М. Показано, что углеродная пыль с размером частиц от 1 до 100 мкм образовывалась как в результате хрупкого разрушения защитных плиток под действием концентрированных плазменных потоков, так и при эрозии предварительно осаждённых в процессе боронизации бороуглеродных плёнок в высокотемпературной водородной плазме и в чистящих гелиевых разрядах с последующей конденсацией эрозионных продуктов в затённых от разряда местах. Металлическая пыль с размером частиц от 10 до 1000 мкм формировалась в результате водородного охрупчивания нержавеющей стали в процессе её взаимодействия с изотопами водорода. При этом на них были видны следы от униполярных микродуг, которые приводили к плавлению стали. Частицы нержавеющей стали становились магнитными, и некоторые из них были сильно окислены или покрыты бороуглеродными плёнками.

Ключевые слова: токамак Глобус-М, пыль, углеграфитовые материалы, нержавеющая сталь, хрупкое разрушение, эрозия.

MORPHOLOGY AND COMPOSITION OF DUST AND DEBRIS PRODUCED IN GLOBUS-M TOKAMAK. R.Kh. ZALAVUTDINOV, A.E. GORODETSKY, A.P. ZAKHAROV, V.K. GUSEV, A.N. NOVOKHATSKY. Morphology, structure and composition of graphite (RGT-91) in-vessel plasma facing components and dust and debris formed during operation of Globus-M tokamak were studied by scanning electron microscopy, X-ray diffraction and electron probe microanalysis, respectively. It has been shown that carbon dust with sizes of 1–100 μ was formed both due to brittle fracture of protective graphite tiles under interaction with high plasma fluxes and erosion of primary deposited B/C films in high temperature hydrogen plasma and also during helium conditioning with subsequent deposition of erosion products in remote parts. Metallic dust with sizes of 10–1000 μ was formed as a result of hydrogen embrittlement of stainless steel under interaction with hydrogen isotopes. The steel was heavily oxidized and quantity of ferrite phase was larger than in the initial steel. There were a lot of traces from microarcs that resulted in steel melting.

Key words: Globus-M tokamak, dust, carbon based materials, stainless steel, brittle fracture, erosion.

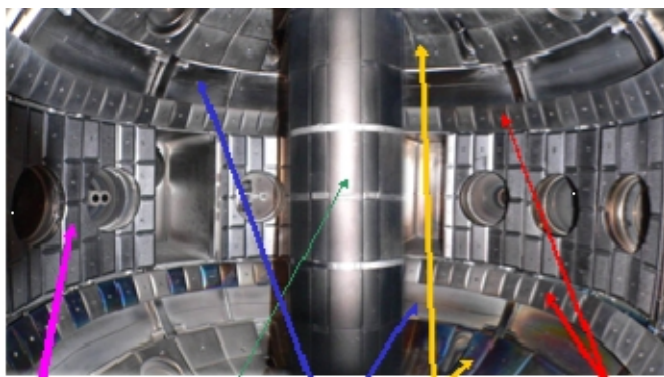
ВВЕДЕНИЕ

Успех международной термоядерной программы во многом зависит от выбора материалов первой стенки, контактирующих с плазмой. В настоящее время наиболее перспективными термоядерными материалами считаются бериллий, углеродные композиты и вольфрам [1]. Одной из методик выбора материала является анализ пыли и крупных частиц (в английской литературе «dust» и «debris»), образующихся в токамаках в процессе их эксплуатации [2]. Углеродная и бериллиевая пыль является сильным аккумулятором трития, затрудняющим его дальнейшее использование в термоядерном цикле [3]. Систематическое изучение пыли в виде нано- и углеводородных структур, гладких плёнок и сфер было выполнено на токамаке Т-10 [4, 5]. Механизмы разрушения графитов при облучении интенсивными потоками плазмы были исследованы на установках МК-200 и КСПУ [6]. Морфологические, композиционные изменения и структурно-фазовые превращения в плазмоконтрактирующих материалах токамака Глобус-М были рассмотрены в работах [7–9].

Целью данной работы являлось изучение морфологии и состава пыли и крупных частиц, образовавшихся в процессе работы токамака Глобус-М.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Сферический токамак Глобус-М, сооруженный в Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе, представляет собой токамак нового поколения (большой радиус плазмы 0,36 м, малый — 0,24 м, тороидальное магнитное поле 0,4 Тл), предназначенный для исследования физических процессов в плазме с диверторной конфигурацией плазменного шнура и отработки инженерных рекомендаций для сферических токамаков мегаамперного диапазона [10]. Эксперименты проводятся в широком диапазоне параметров дейтериевой плазмы (ток плазмы 100–250 кА, электронная концентрация $(0,1–1,0)10^{20} \text{ м}^{-3}$),



Экватори- Внутрен- Открытые по- Дивертор- Тороидаль-
альная по- ний лимит- верхности нержавеющей стали- торные Дивертор- Торoidal-
верхность тер- вующей нержавеющей стали- плитки ные диа-
фрагмы

Рис. 1. Плазмokonтактирующие материалы в токамаке Глобус-М. Открытые поверхности — полированная нержавеющая сталь 12X18H10T, остальные поверхности защищены плитками РГТ-91

удельная мощность, вкладываемая в разряд, до нескольких МВт/м³.

В период 1999—2000 гг. плазмokonтактирующим материалом была нержавеющая сталь. С ноября 2001 г. по июль 2009 г. в камере постепенно устанавливались плитки, изготовленные из рекристаллизованного графита марки РГТ-91 (2% ат. Ti). Графит для диверторных плиток дополнительно легировался 0,3—0,7% ат. Si [11, 12]. К настоящему времени плитки (толщина 5—10 мм, площадь от 100 до 200 см², всего 614 штук) закрывают около 98% всей поверхности, обращённой к плазме (рис. 1).

Физико-механические параметры облицовки, представленные изготовителем (НИИГрафитом, Москва), приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Физико-химические свойства графита РГТ-91 [11]

| Свойство | | ⊥ |
|--|------------|-----------|
| Коэффициент термического расширения (300—1300 К) $\alpha \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ | 2,1—3,1 | 10,0—10,5 |
| Термическая проводимость λ , Вт/(м·К) при: | | |
| 300 К | 850—1050 | 130—190 |
| 1200 К | 250—275 | 55—90 |
| 1800 К | 180—205 | 45—80 |
| Предел прочности на растяжение (300 К) σ_r , МПа | 30—40 | 6,5—7,5 |
| Предел прочности на сжатие (300 К) σ_c , МПа | 35—50 | 75—105 |
| Модуль упругости (300 К) E , ГПа | 34,3 ± 5,0 | 5,6 ± 5,0 |
| Плотность (300 К) ρ , кг/м ³ | 2026—2220 | |
| Температура сублимации, К | 3923 | |
| Теплоёмкость c , Дж/(кг·К) при: | | |
| 300 К | 700 | |
| 1000 К | 1400 | |
| 2000 К | 2100 | |
| 3500 К | 4200 | |

Примечание: || относится к направлению в материале с высокой термической проводимостью, т.е. вдоль базисных плоскостей; ⊥ относится к направлению в материале, перпендикулярном базисным плоскостям, которое параллельно оси сжатия при изготовлении графита.

В течение периода с марта 2006 г. по июль 2009 г. было проведено около 7000 разрядов (общая длительность около 700 с) в конфигурации, при которой 65% внутренней поверхности токамака было закрыто графитом (внутренний лимитер, диверторные плитки и тороидальные диафрагмы). При этом экваториальная поверхность оставалась незащищённой (см. рис. 1). В каждом из разрядов в плазму вводилось 0,5—1 МВт мощности, значительная часть которой выделялась на верхних и нижних диверторных плитках (рис. 2) общей площадью 1,7 м². На поверхность камеры, обращённую к плазме, наносились бороуглеродные пленки (20 боронизаций за указанную кампанию) методом разложения паров карборана (C₂B₁₀H₁₂) в тлеющем разряде в гелии [13]. Пыль и крупные частицы были собраны во время вскрытия установки Глобус-М в июле 2009 г.

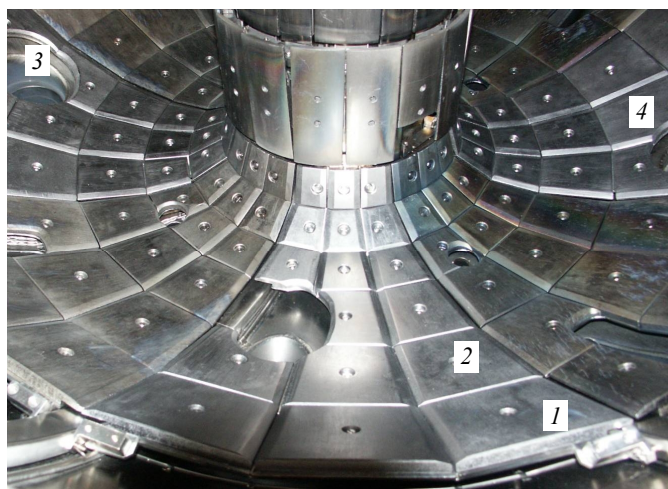


Рис. 2. Нижняя часть токамака Глобус-М: 1, 2 — диверторные графитовые плитки, с которых собиралась пыль; 3, 4 — патрубки, из которых были извлечены пыль и крупные частицы

Пробы собирались мягкой кисточкой в бумажные пакетики с заглушки фланца (3 на рис. 2) и со дна патрубков для ввода карборана (4 на рис. 2). Пыль с нижних диверторных пластин (1 и 2 на рис. 2) была собрана с помощью проводящей липкой полимерной ленты.

Морфология и элементный состав облицовочных плиток [7, 8], пыли и крупных частиц, появившихся в результате эксплуатации Глобус-М в режиме рабочих разрядов и процедур очистки, были изучены на электронно-зондовом микроанализаторе Камебакс (фирма «Камека», Франция) методами растровой электронной микроскопии (РЭМ) и рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) при ускоряющем напряжении 15 кВ и токе 1 нА. Глубина анализа элементного состава ~3 мкм для углеродной матрицы и ~1 мкм для металлической. Диаметр электронного пучка на анализируемых частицах обычно был равен ~1 мкм.

Рентгенофазовый анализ (РФА) образцов (5×10×5 мм), вырезанных из исходных и облучённых плиток [7, 8], а также проб пыли и крупных частиц, был выполнен на дифрактометре ДРОН-3 с медной трубкой ($\lambda_{Cu} = 0,154$ нм) и с графитовым монохроматором. Регистрация дифрагирующих пучков осуществлялась в интервале углов 2θ от 10° до 90° с шагом $0,05^\circ$ и временем экспозиции в каждой точке 1,5 с (глубина анализа составляла ~10 мкм для углеродной матрицы и ~5 мкм для металлической).

В исследованиях РЭМ, РСМА и РФА пробы пыли и крупных частиц размещались на проводящей липкой полимерной ленте. Пробы пыли состояли из легко рассыпающихся, трудно собираемых углеродных и металлических микрочастиц, в основном, блестящего черного цвета. Большая часть магнитных крупных частиц (сотни мкм) имела металлический блеск и цвета побежалости от бледно-желтого до синего.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Графит РГТ-91 имеет сильно выраженную осевую текстуру, степень трёхмерной упорядоченности P_3 (определяемую расстоянием между базисными плоскостями) [14], близкую к единице, размер кристаллитов вдоль базисной плоскости до 300 нм и пористость менее 2% об. Высокие тепловые и механические свойства графитов такого типа, а также перспективность их использования в качестве плазмоконтрактирующих материалов обсуждались, в частности, в работе [15].

Большая часть графитовых плиток была обращена к плазме поверхностью с низкой термической проводимостью, т.е. базисной плоскостью (002) C_β (рис. 3, табл. 2). Обращает на себя внимание профиль пика 1 с небольшим «плечом», примыкающим к основному пику со стороны малых углов. Межплоскостное расстояние (002) C_β для этого «плеча» соответствует расстоянию 0,335 нм в совершенном графите. Основному интенсивному пику следует приписать межплоскостное расстояние 0,333 нм, меньшее, чем в решетке графита. Такое смещение основного пика графитовой структуры связано с небольшим углом между внешней поверхностью и базисными плоскостями.

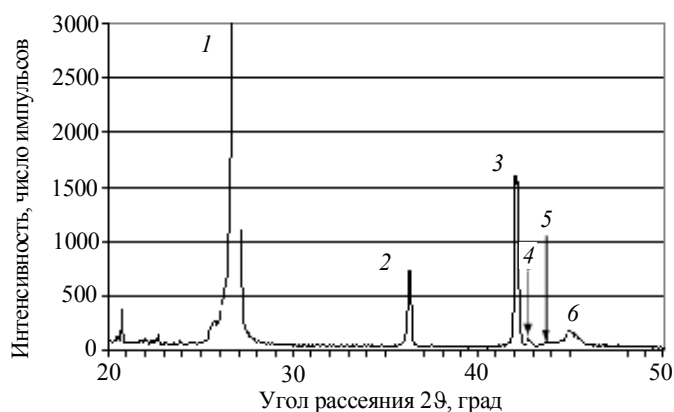


Рис. 3. Дифрактограмма исходной облицовочной плитки РГТ-91 перед установкой в Глобус-М

Т а б л и ц а 2. Параметры дифракционных пиков, представленных на рис. 3

| № | 2θ , град | Интенсивность, число импульсов | (hkl), фаза | d , нм |
|---|------------------|--------------------------------|----------------------------|----------|
| 1 | 26,8 | 28 000 | (002) C_β | 0,333 |
| 2 | 36,4 | 524 | (111) TiC | 0,248 |
| 3 | 42,05 | 1240 | (200) TiC | 0,215 |
| 4 | 42,8 | 40 | (100) C_β | 0,211 |
| 5 | 43,6 | 16 | (101) C_β , ромбоэдр | 0,208 |
| 6 | 44,9 | 127 | (101) C_β | 0,202 |

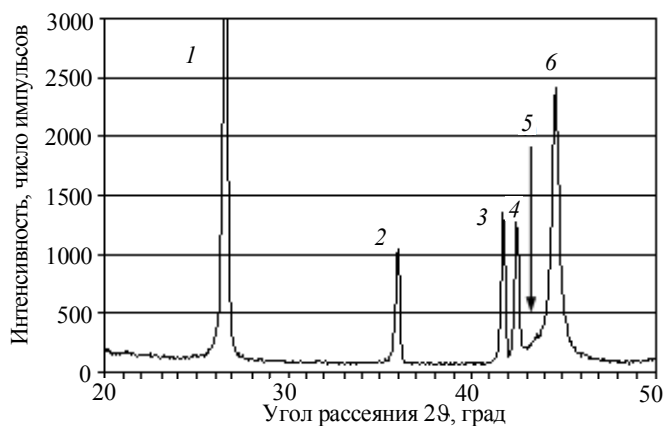


Рис. 4. Дифрактограмма облицовочной плитки РГТ-91 в Глобус-М после кампании 2006—2009 гг.

В результате воздействия плазмы интенсивность пиков $(100)C_{\beta}$ и $(101)C_{\beta}$ по отношению к пику $(002)C_{\beta}$ возросла примерно на два порядка величины (рис. 4, табл. 3). Поверхностный слой РГТ-плиток (толщиной до 10 мкм) терял преимущественную ориентацию, разбивался на отдельные блоки, степень трёхмерной упорядоченности P_3 уменьшалась до 0,75. Полуширина дифракционной линии $(002)C_{\beta}$, измеряемая с точностью до $0,05^{\circ}$ и равная $0,35^{\circ}$, оставалась такой же, как и на дифрактограмме исходной плитки.

Т а б л и ц а 3. Параметры дифракционных пиков, представленных на рис. 4

| № | 2θ , град | Интенсивность, число импульсов | (hkl), фаза | d , нм |
|---|------------------|--------------------------------|-----------------------------|----------|
| 1 | 26,5 | 8340 | $(002) C_{\beta}$ | 0,336 |
| 2 | 35,9 | 1040 | $(111) TiC$ | 0,250 |
| 3 | 41,7 | 1360 | $(200) TiC$ | 0,216 |
| 4 | 42,4 | 1260 | $(100) C_{\beta}$ | 0,213 |
| 5 | 43,5 | 320 | $(101)C_{\beta}$, ромбоэдр | 0,208 |
| 6 | 44,6 | 2430 | $(101) C_{\beta}$ | 0,203 |

Структура карбидных включений не претерпела изменений. Относительная (по отношению к пику $(002)C_{\beta}$) интенсивность пиков $(111)TiC$ и $(200)TiC$ от включений карбида титана увеличилась, указывая на преимущественное распыление и эрозию углеродного компонента РГТ. Соотношение интенсивностей между пиками $(111)TiC$ и $(200)TiC$, по сравнению с исходным образцом, также изменилось в сторону потери упорядочения карбидных включений.

Ромбоэдрическая составляющая структуры графита (пик $(101)C_{\beta}$, 0,208 нм) в обоих образцах имела достаточно малую интенсивность.

После выемки на воздух в поверхностных слоях плиток толщиной около 2 мкм было обнаружено значительное количество дейтерия, бора, углерода, кислорода и металлов [7].

Разрушение плиток (с учётом механических и термических характеристик графита, см. табл. 1) могло происходить либо в результате фокусировки плазменных пучков на площадях масштабом $1\text{--}10\text{ см}^2$, либо в результате водородного охрупчивания и водородной эрозии графита. Разрушенные и охрупченные участки диверторных плиток покрывались бороуглеродной плёнкой в последующих процедурах боронизации и за счёт процессов переосаждения. На рис. 5 следы хрупкого разрушения плитки 1 выделены окружностью.

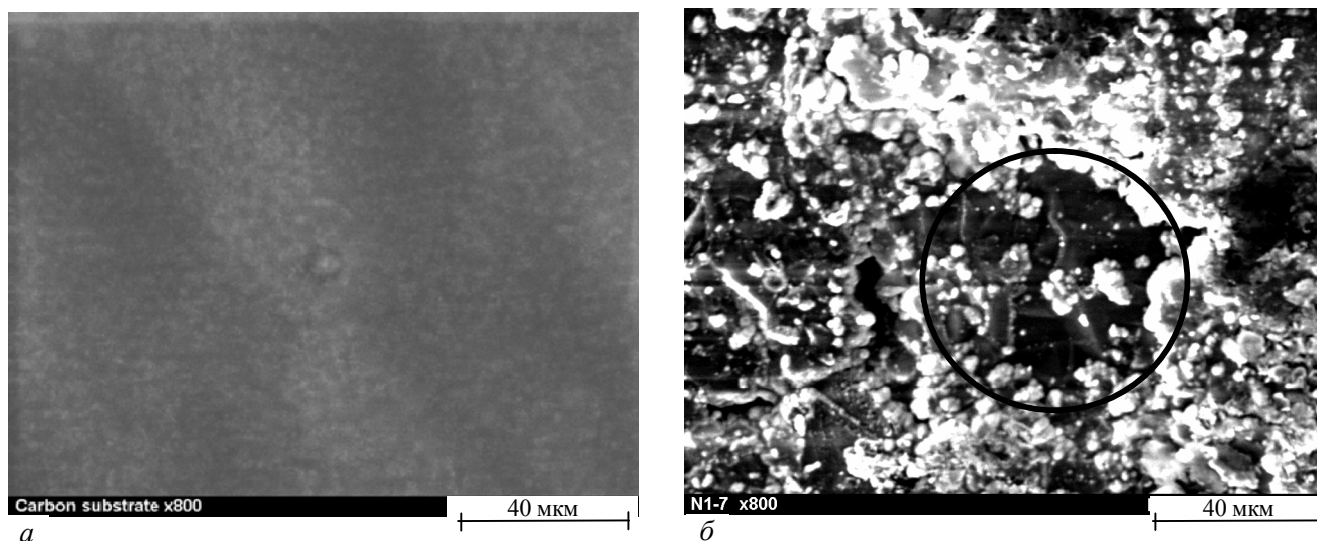


Рис. 5. Диверторная плитка 1 до установки в токамак (а) и после кампании 2006—2009 гг. (б). Окружностью выделена область поверхности, несущая следы хрупкого разрушения графита

Как и в других токамаках [2—5, 17, 18], взаимодействие плазмы со стенкой сопровождалось образованием пыли. Пыль, собранная непосредственно с плитки 2 (рис. 2) с помощью липкой ленты, напоминала щебёнку (рис. 6), элементный состав которой соответствовал РГТ с дополнительными примесями Fe и Cr. Щебёнка состояла из отдельных тонких (субмикронной толщины), несколько изогнутых частиц с острыми краями размером около 10 мкм. Форма частиц указывала на то, что их образование было вызвано процессами хрупкого разрушения РГТ-матрицы. Примерно одинаковая толщина этих частиц наводит на мысль о дейтериевом охрупчивании поверхностных слоёв из-за накопления дейтерия на глубине до 1 мкм облицовочной графитовой плитки. Кроме указанных причин хрупкого разрушения (фокусировка налетающей плазмы на небольших участках облицовочной поверхности), следует указать и на другой важный фактор — многократное термоциклирование материалов, контактирующих с плазмой. В структурном плане щебёнка состояла из кристаллитов графита такого же размера (масштабом 100—300 нм), как и кристаллиты в исходном графите. Достаточно интенсивный фон на рентгенограмме указывал на большой вклад в рассеяние дифрагирующих пучков аморфной составляющей исследуемого препарата.

В образцах пыли, собранной с поверхности заглушки фланца (3 на рис. 2) и со дна патрубка (4 на рис. 2), можно было выделить несколько наиболее интересных, с нашей точки зрения, видов частиц пыли. Это крупные пластинчатые частицы размером от 10 до 1000 мкм, сферические частицы с гладкой поверхностью диаметром от 10 до 30 мкм и губчатые частицы размером до 100 мкм. О крупных пластинчатых частицах будет сказано далее.

В структурном плане углеродные частицы были представлены аморфной фазой (следствие операций боронизации), кристаллической крошкой от плиток РГТ и карбидом титана. По данным РСМА в пробах пыли присутствовал кремний в атомной концентрации в 2—3 раза меньше концентрации Ti. На дифрактограммах пики кубического карбида кремния выделить не удалось из-за практического совпадения с пиками TiC. На некоторых образцах можно было зафиксировать линии слабой интенсивности от карбида бора.

Сферические частицы размером 10—30 мкм (рис. 7, место обозначено как P11) с гладкой поверхностью состояли, в основном, из углерода (88% ат.) и примесей (ат. %): Fe (4,8), Cr (3,3), Ti (2,9), Ni (0,9), Si (0,1). Толщина углеродной оболочки 2—3 мкм при диаметре сферы 10 мкм. Механизм возникновения таких сфер, вероятно, связан с осаждением углерода на металлических частицах и дальнейшим быстрым каталитическим ростом в областях плазмы с температурой несколько электрон-вольт. Другое объяснение формирования сферических частиц основано на экспериментально наблюдаемых фактах. Когда пылевые частицы любой формы размером порядка 10 мкм инжектировались в плазму, то они быстро принимали округлые очертания [17]. Сферическая форма может указывать также на то, что пылевая частица некоторое время находилась внутри плазмы.

Стомикронные углеродные частицы произвольной формы с острыми выступами, внутренними трещинами и кавернами (см. рис. 7, место обозначено как P10) явились следствием двух про-

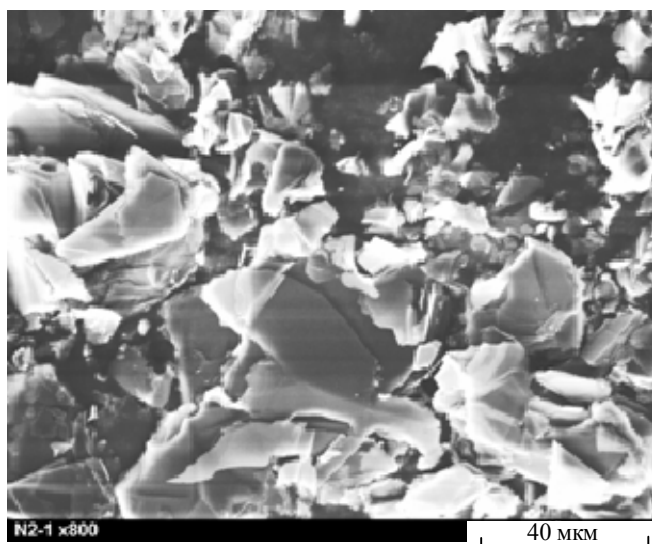


Рис. 6. Пыль, собранная с плитки 2 (см. рис. 2)

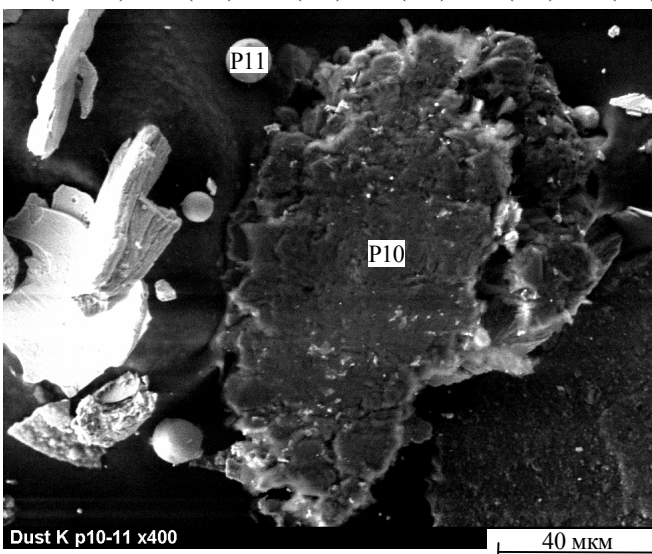


Рис. 7. Сферическая (P11) и комковидная (P10) углеродные частицы, взятые с заглушки патрубка (см. 3 на рис. 2)

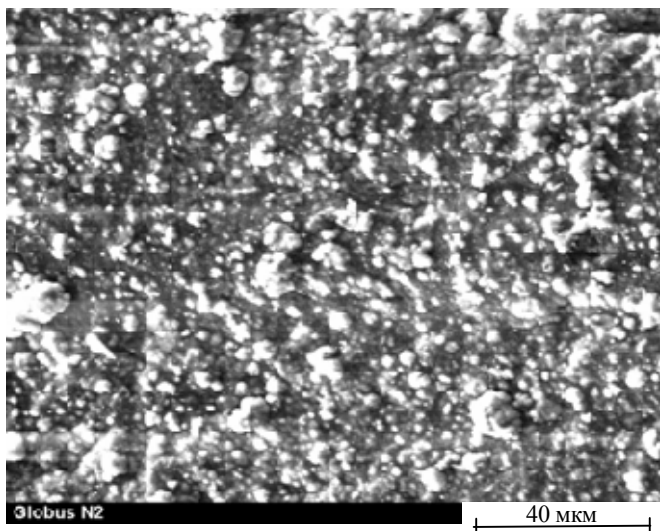


Рис. 8. Углеродный осадок глобулярного типа, образовавшийся на плитке 2 (см. рис. 2)

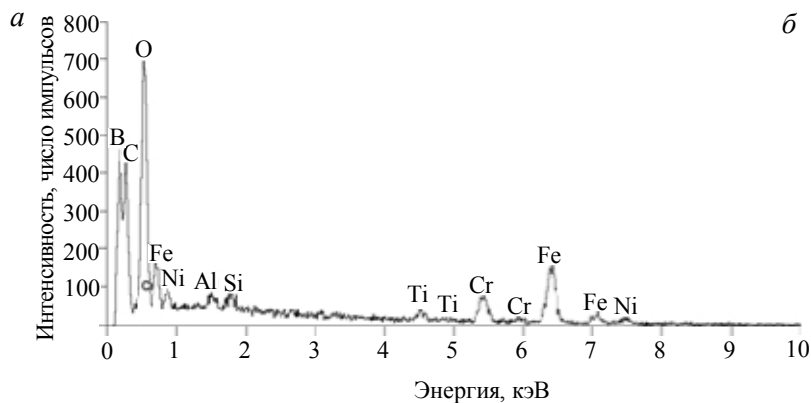
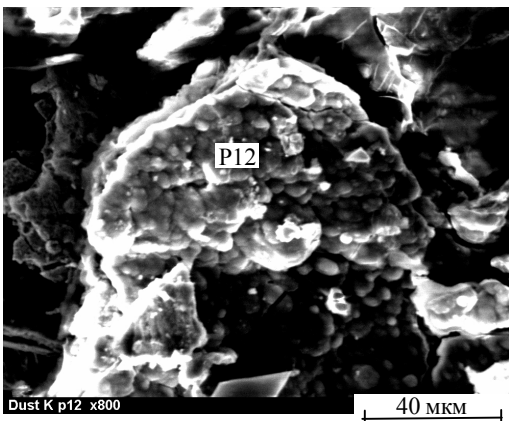


Рис. 9. Частица пыли, собранная со дна патрубка (4 на рис. 2). Место анализа обозначено как P12 (а); характеристический рентгеновский спектр частицы (б)

тограмме можно видеть, кроме линий (002) графита и (111) карбида титана, размытое гало на углах $2\theta = 24,5\text{—}25,5^\circ$, которое мы относим к практически аморфному оксиду бора (B_2O_3) (рис. 10, табл. 4). Участок дифрактограммы на углах $2\theta < 24^\circ$ (1 на рис. 10) связан с рассеянием рентгеновского пучка на липкой ленте-подложке. Трудно представить образование таких частиц во время рабочих разрядов в токамаке.

Можно предположить, что сrostки округлых выделений сформировались на стадии боронизации в тлеющем разряде карборан/гелий с участием металлических примесей-катализаторов. Дальнейшее их превращение в пылевые частицы происходило или во время чистки камеры тлеющим разрядом в гелии, или непосредственно в плазменных разрядах. Обращает на себя внимание большое содержание кислорода в этих бороуглеродных формах. Возможно, такие образования являются сильным геттером кислорода. Здесь следует отметить, что фоновый вакуум в камере токамака строго поддерживался на уровне 10^{-6} Па. Основным источником кислорода (данные РСМА), вероятно, была вода, сорбированная карбораном.



Рис. 10. Дифрактограмма пыли, собранной с плитки 2, которая показывает присутствие аморфной фазы (2, гало)

Т а б л и ц а 4. Параметры дифракционных пиков, представленных на рис. 10

| № | 2θ , град | Интенсивность, число импульсов | (hkl), фаза | d , нм |
|---|------------------|--------------------------------|---------------------|-----------|
| 1 | 20—24 | 1700 | Полимерная подложка | 0,37—0,44 |
| 2 | 25 | 1040 | Аморфный B_2O_3 | 0,209 |
| 3 | 26,35 | 2340 | (002) C_β | 0,337 |
| 4 | 35,8 | 500 | (111) TiC | 0,251 |

В начале 80-х годов XX века академик Б.Б. Кадомцев предсказывал образование микронной металлической пыли в результате накопления водорода, поступающего из плазмы, в поверхностном слое нержавеющей стали, назвав её «металлическим снегом».

Упомянутые пластинчатые частицы размером 10—1000 мкм и толщиной 2—4 мкм (рис. 11, а, б) были похожи на «металлический лёд». Пластинчатые частицы содержали, в основном, компоненты нержавеющей стали (Fe, Cr, Ni, Ti) и кислород (рис. 12). Из расчёта химического состава пластин следует, что в них присутствовали Fe_2O_3 и Cr_2O_3 . На дифрактограммах крупных частиц присутствовали основные дифракционные пики нержавеющей стали (111) с включениями феррита (110) (рис. 13, табл. 5). Однако интенсивность ферритного пика (110) была сравнима с интенсивностью аустенитного пика (111). Этот результат указывает на то, что в отслоившихся частицах стали увеличилось содержание феррита по сравнению с его содержанием в исходной нержавеющей стали (дифрактограмма исходной нержавеющей стали не приводится). Некоторые частицы, как пластинчатые, так и сферические, сравнительно легко притягивались магнитом. Причём магнитные сферические частицы были покрыты микронными слоями углерода, бороуглерода или оксидов железа. Намагниченные крупные частицы под действием внешнего магнитного поля переносились по всей камере токамака, что затрудняло определение конкретного источника образования таких частиц.

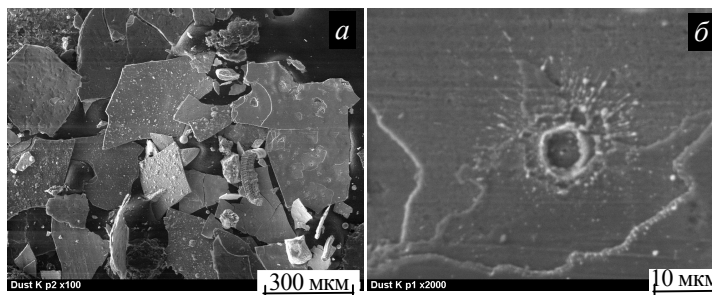


Рис. 11. Микрофотографии пластинчатых частиц, собранных со дна патрубка (4 на рис. 2), на которых видны следы от микродуг и террасы, образовавшиеся в результате расщепления пластин (а). С большим увеличением (б) виден кратер с бортиком

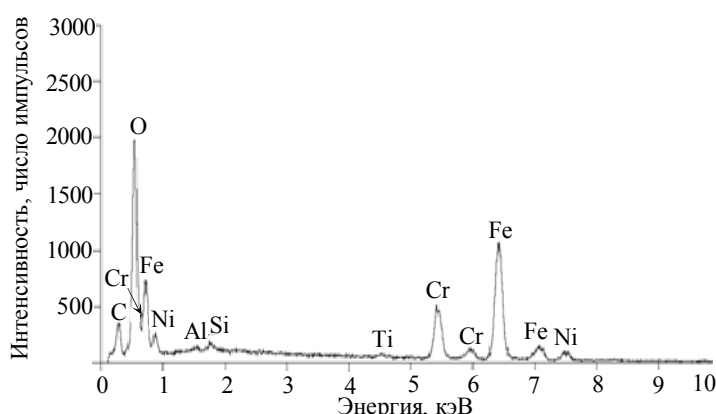


Рис. 12. Характеристический рентгеновский спектр пластинчатой частицы. Следует отметить значительный пик кислорода, свидетельствующий о формировании толстых (более 1 мкм) оксидных слоев

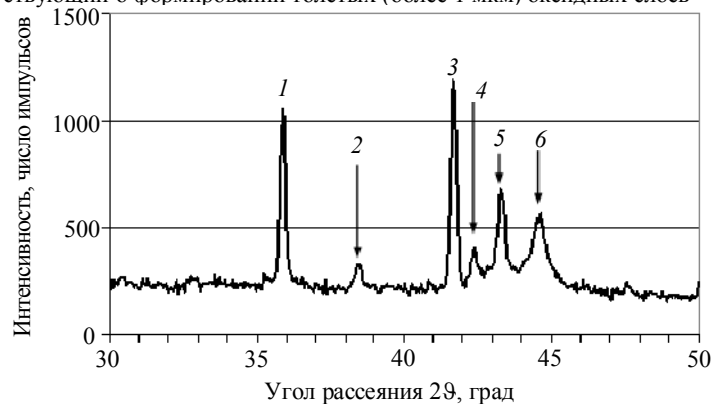


Рис. 13. Дифрактограмма от металлических частиц, собранных со дна патрубка (4 на рис. 2), иллюстрирующая присутствие феррита (б)

Т а б л и ц а 5. Параметры дифракционных пиков, представленных на рис. 13

| № | 2θ , град. | Интенсивность, число импульсов | (hkl), фаза | d , нм |
|---|-------------------|--------------------------------|-------------------------------|----------|
| 1 | 35,9 | 1060 | (111) TiC | 0,255 |
| 2 | 38,4 | 330 | (201) B_4C | 0,234 |
| 3 | 41,7 | 1190 | (200) TiC | 0,216 |
| 4 | 42,35 | 410 | (100) C_β | 0,213 |
| 5 | 43,3 | 680 | (111) аустенит | 0,209 |
| 6 | 38,4 | 570 | (110) феррит, (101) C_β | 0,203 |

На большей части пластинчатых частиц видны следы от униполярных микродуг, которые представляли собой кратер с бортиком (рис. 11, б). Очевидно, что материал плавился во время воздействия на него микродуги. Глубина кратера относительно исходной поверхности пластины и высота бортика составляли около 1 мкм. В радиальных направлениях по периферии кратера разбросаны

сферические частицы диаметром от 0,1 до 1 мкм, вылетевшие из кратера. Разлёт расплавленных частиц от одной микродуги можно было наблюдать на площади 30×30 мкм. Вторым следствием воздействия микродуг являлся плоский когезионный отрыв пластин от массивной матрицы (хрупкое разрушение). Мы насчитали от 1 до 5 последовательных ступеней (этапов) отслоения. Средняя площадь каждой отслоившейся пластинки составляла примерно 30×30 мкм (на одну микродугу). Следует отметить, что в Т-10 [5] и других токамаках [2, 3] не было обнаружено таких металлических частиц, как в токамаке Глобус-М.

По нашему мнению, образование пластин происходило из-за накопления углерода и кислорода в поверхностном слое нержавеющей стали и возникновения механических напряжений и, соответственно, деформаций. Граница между деформированным и недеформированным сплавом проходила на глубине в несколько микрон. На этой глубине скапливался в больших количествах дейтерий. Поэтому связь деформированного слоя с остальным металлом ослабевала. Во время проскакивания микродуги из-за ослабленной связи этого слоя с остальным материалом происходило его отделение от массивного материала.

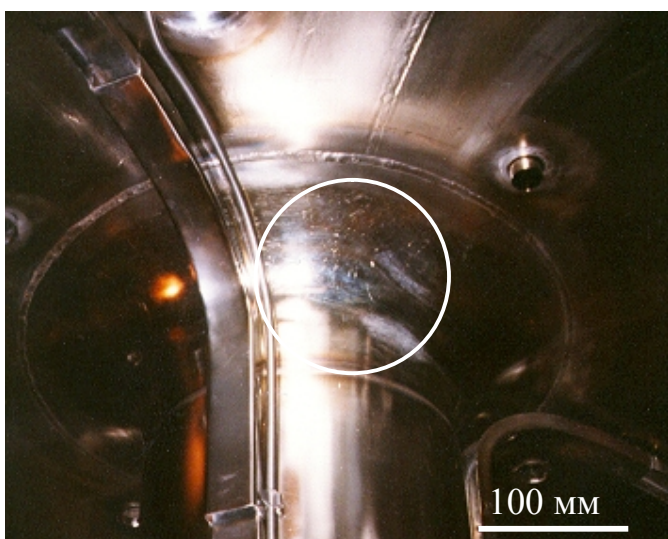


Рис. 14. Участок поврежденной нержавеющей стали 12X18H10T и следы от электрических дуг в верхней части купола (выделены окружностью)

помощью быстрой CCD-видеокамеры Olympus I-SPEED 2 (видеокамера обеспечивала запись с частотой до 30 000 кадров в секунду) показали [19], что во время «нормального разряда», т.е. когда стенки вакуумной камеры хорошо подготовлены и не происходит срывов разряда, регистрировалось небольшое количество пыли.

ВЫВОДЫ

Анализ пыли и крупных частиц позволил выделить три её источника: водородная и гелиевая эрозия предварительно осаждённых бороуглеродных плёнок, плиток РГТ и металлических деталей в чистящем тлеющем разряде с последующей конденсацией эрозионных продуктов в затенённых от разряда местах; хрупкое разрушение защитных графитовых РГТ-плиток под действием концентрированных плазменных потоков; водородное охрупчивание нержавеющей стали с увеличением доли феррита, её окисление, разрушение и плавление в результате воздействия униполярных дуг.

Анализ пыли и крупных частиц позволил заключить, что контакт плазмы с нержавеющей сталью в токамаке должен быть полностью исключён. Графит марки РГТ-91 является достаточно перспективным материалом первой стенки. Его дальнейшая модификация должна быть направлена на придание ему большей изотропности по отношению к тепловым и механическим свойствам [15].

Для минимизации образования пыли в токамаке операцию боронизации следует проводить с осторожностью, не вводя больших количеств карборана в рабочую камеру.

Работа выполнена по Программе фундаментальных исследований Президиума РАН № 27 (2010 г.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Skinner C.H., Haasz A.A., Alimov V.Kh. et al. — Fusion Sci. and Technol., 2008, vol. 54, p. 891.
2. Ivanova D., Rubel M., Philipps V. et al. — Phys. Scr., 2009, T138. 014025 (6 p.).
3. Rohde V., Balden M., Lunt T. et al. — Phys. Scr., 2009, T138. 014024 (5 p.).
4. Крауз В.И., Мартыненко Ю.В., Свечников Н.Ю. и др. — Успехи физических наук, 2010, т. 180, № 10, с. 1055.
5. Кислов А.Я., Сковорода А.А., Спицын А.В. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2010, вып. 2, с. 19.
6. Архипов Н.И., Сафронов В.М., Барсук В.А. и др. Эрозия углеграфитовых материалов при облучении интенсивными потоками плазмы. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2009, вып. 4, с. 3.
7. Gusev V.K., Alimov V.Kh., Arkhipov I.I. et al. — J. Nucl. Mater., 2009, vol. 386—388, p. 708.
8. Gusev V.K., Alimov V.Kh., Arkhipov I.I. et al. — Nucl. Fusion, 2009, vol. 49, 095022 (6 p.).
9. Gusev V.K., Aleksandrov S.E., Alimov V. Kh. et al. — Nucl. Fusion, 2009, vol. 49, 104021, (11 p).
10. Gusev V.K., Golant V.E., Gusakov E.Z. et al. — Technical Physics, 1999, vol. 44, p. 1054.
11. Burtseva T.A., Chugunov O.K., Dovguchits E.F. et al. — In: Proc. of 6th Intern. Workshop Carbon Materials. Binary Materials for Plasma-Facing Components. Jülich, Germany, 23—24 September, 1993, p. 43.
12. Gorodetsky A.E., Markin A.V., Chernikov V.N. et al. — Fusion Engineering and Design, 1998, vol. 43, p. 129.
13. Sharapov V.M., Mirnov S.V., Grashin S.A. et al. — J. Nucl. Mater., 1995, vol. 220—222, p. 730.
14. Курдюмов А.В., Малоголовец В.Г., Новиков Н.В., Пилянкевич А.Н., Шульман Л.А. — В сб.: Полиморфные модификации углерода и нитрида бора. Справ. изд. — М.: Металлургия. 1994. 318 с. (С. 30).
15. García-Rosales C., López-Galilea I., Ordás N. et al. — J. Nucl. Mater., 2009, vol. 386—388, p. 801.
16. Сайкс А. — Журнал технической физики, 1999, т. 69, с. 50.
17. Цытович В.Н., Винтер Дж. — Успехи физических наук, 1998, т. 168, № 8, с. 899.
18. Winter J. — Plasma Phys. Control. Fusion, 2004, vol. 46, p. B583.
19. Gusev V.K., Ver B.Ya., Gorodetsky A.E. et al. — In: Europhysics Conference Abstracts, vol. 34A, ISBN 2-914774-62-2. 37th EPS Conf. on Plasma Physics. Dublin, Ireland, 21—25 June, 2010, 4-page papers. P2.167.

Статья поступила в редакцию 23 декабря 2010 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Термоядерный синтез, 2011, вып. 1, с. 39—47.