

А.А.АЙРАПЕТОВ<sup>1</sup>, Н.А.ПУНТАКОВ<sup>1</sup>, Л.Б.БЕГРАМБЕКОВ<sup>1</sup>,  
С.С.ДОВГАНЮК<sup>1</sup>, А.В.ГРУНИН<sup>1</sup>, А.С.КАПЛЕВСКИЙ<sup>1</sup>, А.В.ТЕНИШЕВ<sup>1</sup>,  
С.А.ГРАШИН<sup>2</sup>, И.И.АРХИПОВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

<sup>2</sup>НИЦ «Курчатовский институт», Москва

<sup>3</sup>ИФХЭ РАН им. А.Н. Фрумкина, Москва

## **СВОЙСТВА ГРАФИТА, ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ КОНТАКТИРУЮЩИХ С ПЛАЗМОЙ ЭЛЕМЕНТОВ ТОКАМАКА Т-15МД**

В качестве материала контактирующих с плазмой элементов токамака Т-15МД предполагается использовать графит. В работе проведено комплексное исследование выбранного с этой целью графита (далее: ГТ-15МД): измерены плотность, теплопроводность, коэффициенты распыления при различных условиях, определены величины захвата изотопов водорода и характер модификации структуры графита при облучении ионами водородной плазмы.

Для выполнения работы использовался ряд экспериментальных установок и приборов, в том числе МИКМА (Многофункциональный исследовательский комплекс масс-спектрометрического анализа [1]), СОПТМАТ (Стенд осаждения покрытий и тестирования материалов [2]), сканирующий электронный микроскоп Tescan Vega 3 с приставкой энергодисперсионного анализа, анализатор температуропроводности и теплопроводности Netzsch LFA-427 и другие.

Были получены следующие результаты:

1. Определена плотность ГТ-15МД ( $1,82 \pm 0,02$  г/см<sup>3</sup>). Плотность ГТ-15МД попадает в диапазон плотностей графитов МПГ-6 [3], МПГ-7 [3] и МПГ-8[4].

2. Показано, что теплопроводность ГТ-15МД при комнатной температуре одинакова в трех взаимно-перпендикулярных направлениях ( $118 \pm 6$  Вт/м×К), что свидетельствует об изотропности графита, и совпадает с данными для МПГ-6, плотность которого  $1,779 \pm 0,004$  г/см<sup>3</sup> [5]. Зависимость теплопроводности в диапазоне температур 20-1400 °С в общем совпадает с данными для графитов марки МПГ-6: экспоненциальное падение с температурой. Теплопроводность составляет  $103 \pm 5$  Вт/м×К при 200 °С,  $60 \pm 3$  Вт/м×К при 1000 °С,  $54 \pm 3$  Вт/м×К при 1400 °С.

3. Исследование графита на растровом электронном микроскопе с энергодисперсионным рентгеновским анализом не показало наличие примесей в графите (чувствительность составляла 0,05 весовых %).

Проанализирована структура графита, проведено его сравнение с графитом МПГ-8. Размер зерен ГТ-15МД составлял примерно 60 мкм (у МПГ-8 до 100 мкм). Поверхность слома ГТ-15МД и МПГ-8 выявила объёмные поры, средний размер которых составлял 10 мкм. В отдельных случаях, размер пор достигал 20 мкм у ГТ-15МД и 30 мкм у МПГ-8. Поры различных размеров распределены на поверхности слома равномерно, в области  $50 \times 50 \text{ мкм}^2$  в среднем по 10-15 пор у ГТ-15МД и 15-20 у МПГ-8.

4. Определена эффективность различных режимов (температура/длительность) предварительного отжига графита Г-15МД. Измерения методом термодесорбции показали, что средняя концентрация водорода в ГТ-15МД составляет  $2.7 \times 10^{18}$  ат/г (0,005 ат.%). При прогреве графита при температуре 773К за 1 час удаляется около 40% водорода, за 2 часа – 75%. Для удаления более 90% водорода графит необходимо прогревать примерно 6 часов при 773К, 30 минут при 1023 К или 3 минуты при 1273 К.

5. Исследован захват ионов дейтериевой плазмы и водорода остаточного газа в графит ГТ-15МД при различных энергиях облучающих ионов. Спектры термодесорбции водорода, внедренного в ГТ-15МД, аналогичны спектрам термодесорбции МПГ-8. Захват дейтерия в ГТ-15МД выходит на насыщение при дозе облучения  $4.4 \times 10^{23}$  ат/м<sup>2</sup> при энергии ионов, как 100 эВ/ат ( $1 \times 10^{21}$  ат/м<sup>2</sup>), так и 650 эВ/ат ( $3 \times 10^{21}$  ат/м<sup>2</sup>) (Рис.1).

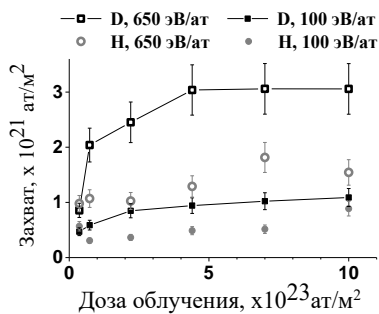


Рис. 1. Зависимость захвата дейтерия и водорода в ГТ-15МД от дозы облучения ионами дейтерия с энергиями 100 и 650 эВ/ат.

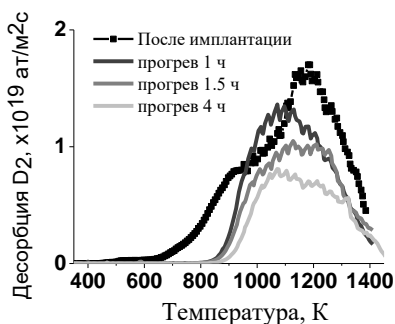


Рис. 2. ТДС спектры  $D_2$  из ГТ-15МД после имплантации дейтерия и выдержки при температуре 773К различное время.

Количество захваченного дейтерия в ГТ-15МД примерно в 3 раза выше, чем в МПГ-8 [1]. Сравнение спектров ТДС обоих графитов показывает, что превышение захвата дейтерия в графит ГТ-15МД происходит как в

приповерхностных слоях, так и радиационных ловушках в зоне торможения ионов. Это обстоятельство, с учётом несколько большей пористости графита МПГ-8 по сравнению с графитом в ГТ-15МД, позволяет предположить меньшую степень кристаллизации последнего.

При энергии ионов 100 эВ/ат захват водорода (из остаточного газа) в ГТ-15МД выходит на насыщение ( $6,8 \times 10^{20}$  ат/м<sup>2</sup>) при дозе облучения  $7 \times 10^{23}$  ат/м<sup>2</sup>. При энергии ионов 650 эВ/ат рост захвата водорода продолжается вплоть до дозы  $1 \times 10^{20}$  ат/см<sup>2</sup> ( $1,5 \times 10^{21}$  ат/м<sup>2</sup>).

Исследовано термическое обезгаживание графита Т-15МД, облученного ионами дейтериевой плазмы с энергией 650 эВ/ат до насыщения (количество захваченного дейтерия  $3 \times 10^{21}$  ат/м<sup>2</sup>). Показано, что при отжиге графита при температуре 773 К из него за 1 час десорбируется около 30%, а за 4 часа – более 50% захваченного дейтерия (Рис.2).

Исследована зависимость захвата в графит ионов дейтериевой плазмы с энергией 100 эВ/ат и водорода остаточного газа от температуры облучения. Показано, что повышение температуры облучения с 630 К до 1023 К приводит к шестикратному уменьшению захвата дейтерия и двукратному уменьшению захвата водорода.

7. Измерены коэффициенты распыления графита ГТ-15МД. Коэффициенты распыления при облучении ионами с энергией 180 эВ/атом и 350 эВ/атом, плотности потока  $2,6 \times 10^{20}$  ион/м<sup>2</sup>с и температуре 330 К близки к коэффициентам распыления графита МПГ-8 (Рис.3). При больших энергиях коэффициент распыления уменьшается. При увеличении потока до  $3,8 \times 10^{20}$  ион/м<sup>2</sup>с при 350 эВ/атом или при 180 эВ/атом при увеличении температуры до 750 К коэффициент распыления ГТ-15МД увеличивается и составляет  $0,17 \pm 0,01$  и  $0,15 \pm 0,01$ . При этом, стоит отметить, что развитие пористости поверхности ГТ-15МД при облучении ионами с плотностью потока  $2,6 \times 10^{20}$  ион/м<sup>2</sup>с при температурах 330-350 К происходит заметно медленнее, чем поверхности графита МПГ-8.

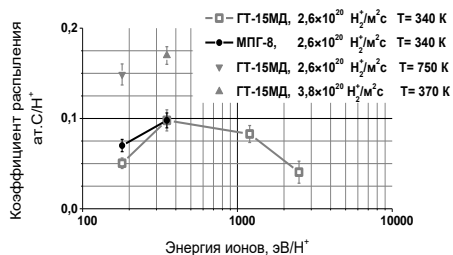


Рис.3. Коэффициенты распыления графитов ГТ 15МД и МПГ 8 при различных условиях облучения ионами водорода.

8. Изучена модификация поверхности при высокотемпературном облучении интенсивными ионными потоками.

Исследования проводились на установке СОПТМАТ в диапазоне температур 1900–2000 °С, плотность потока ионов водорода составляла  $9,3 \pm 0,9 \times 10^{21}$  ат./м<sup>2</sup>с. Облучение при таких параметрах приводило к развитию поверхностной пористости, достигающей 40%, когда доза облучения достигала  $5,8 \times 10^{24}$  ат./м<sup>2</sup> при температуре 1900 °С и 60% - при температуре 2000 °С. Высокая скорость диффузии в глубину графита вакансий, образующихся в зоне торможения ионов, приводила к развитию пористости в приповерхностном слое. Плотность графита в приповерхностном слое в среднем составляла 80% от первоначальной при температуре 2000 °С и дозе  $2,9 \times 10^{24}$  ат./м<sup>2</sup>, при этом пористый слой распространялся на глубину 1,5 мм. Распыление графита при этих условиях определялось механизмом радиационно-ускоренной сублимации (Radiation Enhanced Sublimation – RES). С ростом глубины пористого слоя, скорость поступления атомов углерода из глубины графита на поверхность и скорость их распыления уменьшались. В результате, толщина пористого слоя и коэффициент распыления графита стабилизировались. Однако, даже в режиме стабилизации коэффициент распыления графита в разы превышал его значение при распылении в условиях умеренных температур.

На основании проведенных измерений, можно сделать вывод, что данный графит, в целом, не сильно отличается от графита МПГ-8, широко использовавшегося в термоядерных установках. Вместе с тем, следует отметить, что в условиях работы в режимах с длинными импульсами может потребоваться его защита от облучения интенсивными ионными потоками, во избежание сравнительно быстрой эрозии. Роль защитного *in situ* восстанавливаемого покрытия может выполнять покрытие кристаллического карбида бора.

#### Список литературы

1. Айрапетов А.А., и др., Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2018, № 6, с.48-53.
2. Begrambekov, L.V. et.al. 2019 JPCS, 1328 (1), № 012031.
3. Бутырин Г. М., ХИМИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА, 2015, № 5, с. 40–53
4. Сковорода А., и др. ВАНТ: Термоядерный синтез. 2008. № 3. с. 15-34
5. Станкус С.В., и др. // ТВТ. 2013. Т. 51. № 2. С. 205.