

УДК 539.2:539.12.04

## Эрозия графитовой ткани при бомбардировке ионами водорода и гелия с энергией 20 кэВ

ГУСЕВА М. И., БУШАРОВ Н. П., КРАСУЛИН Ю. Л., РОЗИНА И. А.

Графит обладает некоторыми уникальными свойствами, которые дают основание рассматривать его как перспективный конструкционный материал для термоядерного реактора. В настоящее время обсуждается применимость графита для защиты металлической первой стенки от воздействия плазмы [1—5]. В частности, авторы работ [1, 2] предложили ввести между плазмой и первой стенкой занавес из легкой графитовой ткани и показали применительно к параметрам реактора UWMAK II преимущества использования такого экрана в отношении уменьшения загрязнения плазмы тяжелыми примесями и увеличения срока службы первой стенки [1, 2]. Согласно [1, 6], в реакторе UWMAK II ожидаются следующие потоки заряженных частиц на стенку:  $1,3 \times 10^{14} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  ионов  $D^+$  и  $T^+$  с энергией 20 кэВ,  $6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  ионов  $He^+$  с энергией 20 кэВ, а также  $2,2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  ионов  $He^{2+}$  со средней энергией 100 кэВ.

В работе [7] приведены данные об эрозии графитовой ткани под действием ионов дейтерия и гелия с энергией 100 кэВ при интегральных

дозах облучения  $1,9 \cdot 10^{18}$  и  $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$  в области температур до 800 °С.

В настоящей работе аналогичные исследования проведены при энергии ионов  $H_2^+$  и  $He^+$  20 кэВ, дозах облучения  $3 \cdot 10^{18}$  и  $1,5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$  и  $T_{обл} \leq 1200$  °С. Коэффициент распыления графитовой ткани определяли методом взвешивания. До и после облучения мишень прогревалась в вакууме при 1200 °С.

В экспериментах использовали графитовую ткань марки WCA [1, 8], переданную профессором Висконсинского университета Г. Кульчинским. В качестве сырья при изготовлении графитовой ткани используется целлюлозная пряжа, которая подвергается пиролизу, механической обработке в процессе пиролиза и графитизации при 2000 °С.

Бомбардировку графитовой ткани ионами  $H_2^+$  и  $He^+$  с энергией 20 кэВ проводили в ускорителе ИЛУ-3 [9]. Интенсивность ионного пучка на мишень составляла  $1,25 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Конструкция приемного устройства позволяла варьировать температуру в процессе облучения от комнатной до 1500 °С. Температура образца контролировалась вольфрамо-рениевой термопарой, а также оптическим пирометром. Начальный вакуум в камере приемника  $10^{-7}$  мм рт. ст.

Поверхность облученных мишеней исследовалась в сканирующем электронном микроскопе «Stereoskan» S4-10.

На рис. 1 и 2, а при различном увеличении показаны необлученные участки графитовой ткани WCA. Отдельные нити ткани диаметром 7—9 мкм (рис. 1) имеют тонкую структуру (см. рис. 2, а). Каждая нить состоит из набора цилиндрических волокон диаметром 1,25—2 мкм, расположенных параллельно друг другу. На поверхности необлученной ткани имеется большое число наростов круглой и овальной формы.

Рис. 2 иллюстрирует поверхность ткани после бомбардировки ионами  $H_2^+$  (б) и  $He^+$  (в) с энергией 20 кэВ при дозе  $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$  и температуре близкой к комнатной. При одних и тех же условиях эксперимента ионы водорода и гелия оказывают различное воздействие на структуру поверхности ткани. В результате облучения

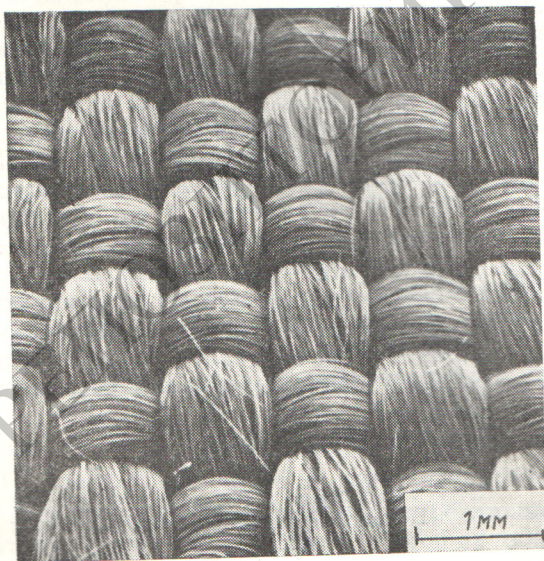


Рис. 1. Микрофотография поверхности необлученной графитовой ткани

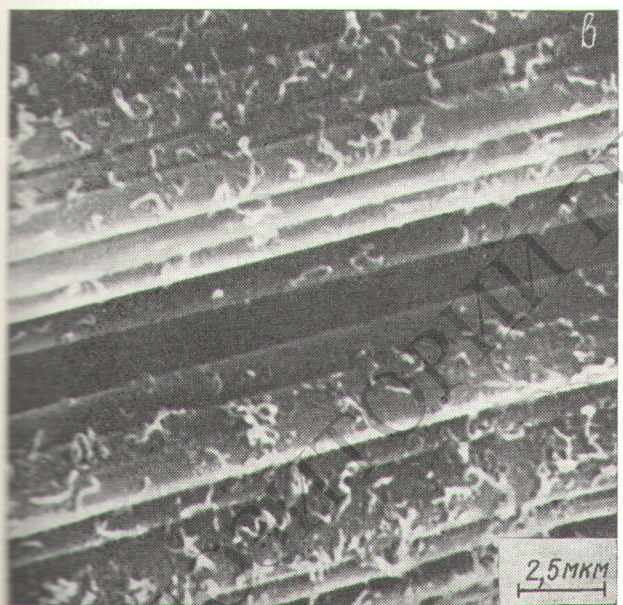
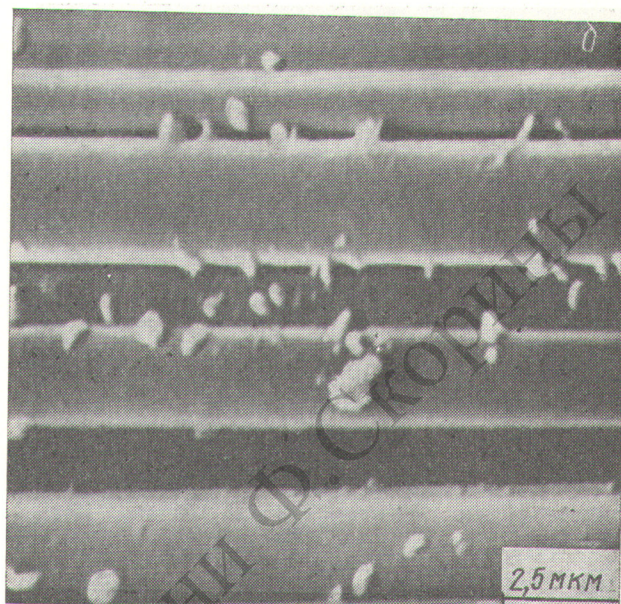
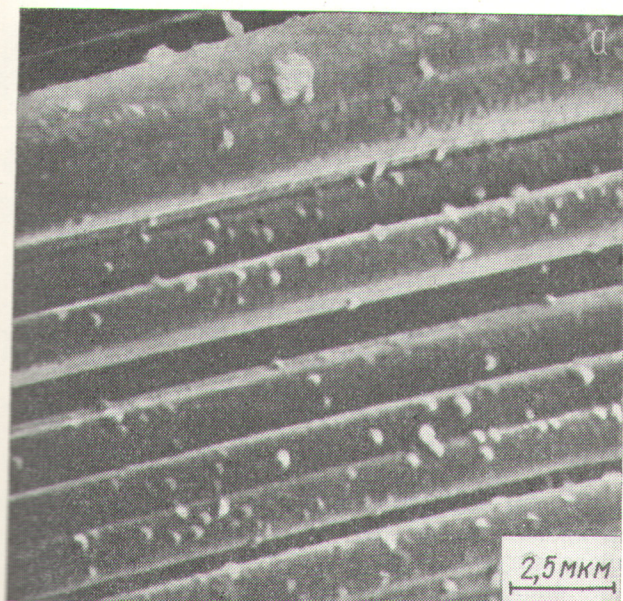


Рис. 2. Микрофотографии поверхности графитовой ткани, облученной (а) и облученной ионами  $H_2^+$  (б) и  $He^+$  (в) с энергией 20 кэВ при комнатной температуре,  $D = 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$

ионами водорода структура поверхности графита WCA практически остается неизменной — уменьшается лишь концентрация наростов на волокнах. Увеличение дозы облучения ткани ионами  $H_2^+$  в 10 раз также не оказывает существенного влияния на структуру поверхности ткани. Имплантация же ионов  $He^+$  приводит

к своеобразному шелушению ткани. На волокнах появляется большое число волосков длиной до 1,5 мкм. По-видимому, ионы  $H^+$  с энергией 10 кэВ оказывают только распыляющее действие, а при внедрении ионов гелия превалирует эффект аналогичный блистерингу в металлах.

На рис. 3 представлены микрофотографии поверхности графитовой ткани, облученной ионами  $H_2^+$  ( $D = 1,5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$ ) и  $He^+$  ( $D = 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ ) с энергией 20 кэВ при 300 °С\*. Как видно из рис. 3, а, бомбардировка графита ионами водорода при  $T_{\text{обл}} = 300 \text{ °С}$  существенно изменяет структуру ее поверхности. Волокна потеряли свою первоначальную цилиндрическую форму. Нить стала рыхлой, как после травления. При температуре облучения 300 °С коэффициент распыления графитовой ткани ионами  $H^+$  с энергией 10 кэВ составляет  $7 \cdot 10^{-2}$  атом/ион, т. е. почти в 3 раза превышает измеренное в работе [10] значение  $S$  графитовой ткани при температуре близкой к комнатной. После внедрения ионов  $He^+$  (рис. 3, б) эрозия графитовой ткани имеет такой же характер, как при комнатной температуре (см. рис. 2, в).

\* В данном эксперименте температура ткани контролировалась только с помощью термопары. Вследствие плохой теплопроводности графитовой ткани истинная температура ее поверхности может быть выше температуры, измеренной в соседней точке с помощью термопары.

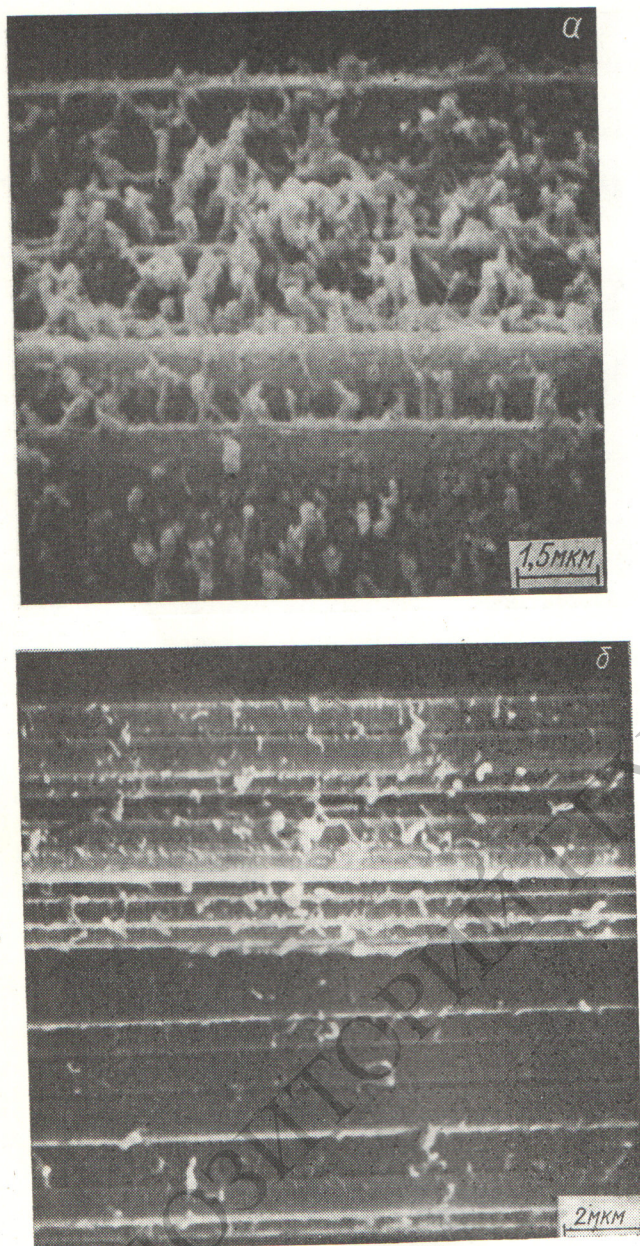


Рис. 3. Микрофотографии поверхности графитовой ткани, облученной при 300 °С ионами  $H_2^+$  (а) и  $He^+$  (б) с энергией 20 кэВ.

По-видимому, при  $T_{обл} = 300$  °С, как и в случае особо чистого графита, при бомбардировке которого ионами водорода наблюдали аномально высокую скорость распыления ( $8,5 \times 10^{-2}$  атом/ион) и образование молекул  $CH_4$  [11], графит WCA также распыляется химически ионами  $H_2^+$ .

Предполагается [1, 2], что рабочая температура графитового занавеса будет  $\sim 1200$  °С. На рис. 4 приведена микроструктура поверхности графитовой ткани после облучения ионами  $H_2^+$  ( $D = 1,5 \cdot 10^{19}$  см $^{-2}$ ) и  $He^+$  ( $D = 3 \cdot 10^{18}$  см $^{-2}$ ) с энергией 20 кэВ при температуре 1200 °С. Структура ткани, облученной ионами водорода (см. рис. 4, б) и гелия (см. рис. 4, в), имеет один и тот же характер и мало отличается от исходной (см. рис. 4, а). Ионная бомбардировка очищает поверхность ткани от имевшихся на ней до облучения наростов, в результате чего она становится более гладкой. Коэффициент распыления графитовой ткани ионами  $H^+$  с энергией 10 кэВ (ион  $H_2^+$  при взаимодействии с поверхностью диссоциирует на два иона  $H^+$  с энергией 10 кэВ) при 1200 °С уменьшается до 0,03 атом/ион. Исходя из этого, а также из сравнения микроструктуры поверхности графита после облучения при 300 °С (см. рис. 3) и 1200 °С (см. рис. 4, б), можно сделать вывод, что при  $T_{обл} = 1200$  °С ионы  $H^+$  с графитом практически не взаимодействуют химически. Эрозия поверхности нити в процессе имплантации ионов гелия при  $T_{обл} = 1200$  °С (см. рис. 4, в) также существенно меньше, чем при комнатной температуре (см. рис. 1, в). Эффект блистеринга практически подавлен, так как при 1200 °С весь внедренный газ диффундирует наружу [12]. Суммарный коэффициент эрозии графитовой ткани ионами  $He^+$  с энергией 20 кэВ при температуре 1200 °С, определенный по убыли массы мишени, составляет 0,13 атом/ион. Это значение мало отличается от опубликованных коэффициентов распыления различных сортов графита ионами гелия ( $E = 20$  кэВ) при комнатной температуре [13]. Таким образом, при 1200 °С износ поверхности графитовой ткани обусловлен главным образом физическим распылением.

По данным работы [7], при бомбардировке графитовой ткани ионами  $D^+$  и  $He^+$  с энергией 100 кэВ эрозия ее поверхности за счет эффекта блистеринга максимальна при комнатной температуре и минимальна при  $T_{обл} > > 800$  °С.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы относительно стойкости графитовой ткани WCA под пучками ионов водорода и гелия с энергией 20 кэВ:

при температуре близкой к комнатной основным процессом, приводящим к эрозии графитовой ткани, является эффект блистеринга при имплантации ионов  $He^+$ ;

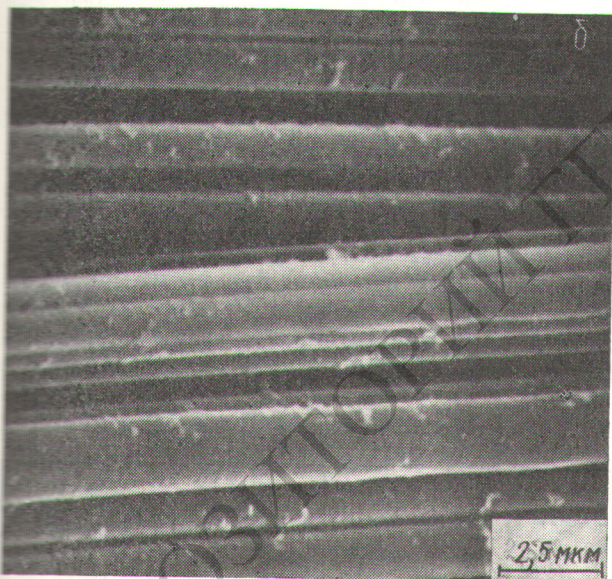
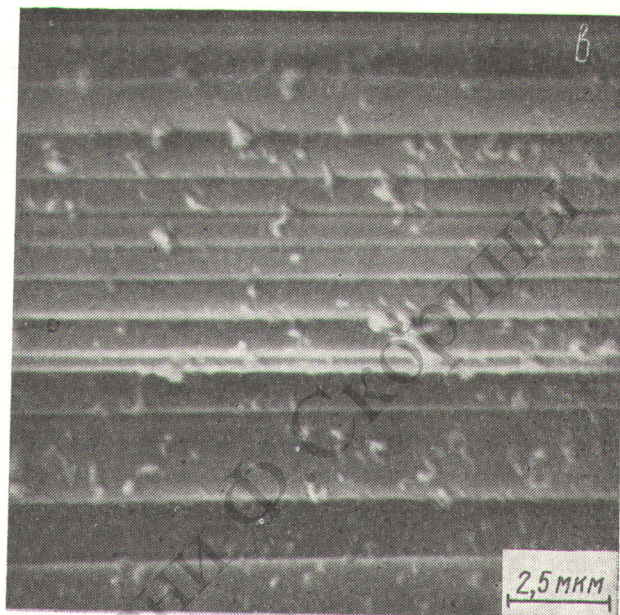
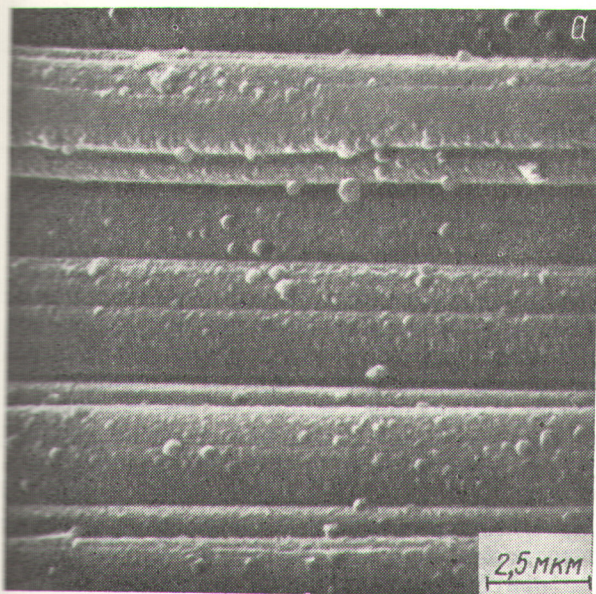


Рис. 4. Микрофотографии поверхности графитовой ткани при различном увеличении:

а — участок необлученной ткани; б — облученной ионами  $H^+$  с энергией 20 кэВ  $D = 1,5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$  при 1200 °С; в — облученной ионами  $He^+$  с энергией 20 кэВ  $D = 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$  при 1200 °С.

при  $T_{\text{обл}} = 300 \text{ °С}$  доминирующий механизм эрозии — химическое распыление графита WCA ионами водорода;

при нагреве до 1200 °С износ ткани минимален и обусловлен физическим распылением поверхности бомбардирующими ионами.

Таким образом, хотя авторы проекта реактора с графитовым занавесом в качестве экрана первой стенки [1, 2] и не учитывали температурную зависимость скорости эрозии ионами  $H^+$  и  $He^+$ , рабочая температура занавеса 1200 °С является оптимальной, так как соответствует минимальному износу экрана.

В заключение авторы выражают благодарность профессору К. Кульчинскому, который инициировал проведение исследований, и В. М. Гусеву за постоянный интерес к работе.

Поступила в Редакцию 17/1 1977 г.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kulcinski G. e.a. UWFD-108, Wisconsin, 1975.
2. Kulcinski G., Conn R., Lang G. «Nucl. Fusion», 1975, v. 15, N 2, p. 327.
3. Kulcinski G. e.a. UWFD-127, Wisconsin, 1975.
4. Гусев В. М. и др. Препринт ИАЭ-2545. М., 1975.
5. Hopkins G. In: Proc. First Topical Meeting on the Technology of Controlled Nuclear Fusion. San Diego, USA, 1974, p. 437.
6. Conn R. e.a. In: Proc. 5th Intern. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion. Tokyo, 1974.
7. Ekern R., Das S., Kaminsky M. In: Proc. Intern. Conf. Surface Effects in Controlled Fusion Devices, San Francisco, USA, 1976.
8. Fouerdeaux A., Perret R., Ruland W. In: Proc. Intern. Conf. Carbon Fibers. London, 1971.
9. Гусев В. М. и др. «Приборы и техника эксперимента», 1969, № 4, с. 24.
10. Behrlich R. e.a. «J. Nucl. Mater.», 1976, v. 60, p. 321.
11. Бушаров Н. П. и др. «Физика плазмы», 1976, т. 2, № 4, с. 588.
12. Thomas G. e.a. He and H Implantation of Vitreous Silica and Graphite. Sandia Lab. 75-8748, 1975.