

04;05;12

ХРУПКОЕ РАЗРУШЕНИЕ УГЛЕГРАФИТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИНТЕНСИВНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ПОТОКОВ ВОДОРОДНОЙ ПЛАЗМЫ

© М.И.Гусева, В.М.Гуреев, Ю.В.Мартыненко, П.Г.Московкин,
В.Е.Неумоин, Ю.А.Соколов, О.В.Стативкина, В.Г.Столярова,
В.И.Васильев, С.В.Рылов, В.М.Струнников

Российский научный центр "Курчатовский институт";

123182 Москва, Россия

(Поступило в Редакцию 17 апреля 1995 г.)

В окончательной редакции 10 января 1996 г.)

Анализ работ по эрозии графита при тепловом ударе показал, что его эрозия значительно отличается от эрозии металлов — преобладает растрескивание и эмиссия частиц. Предложена модель хрупкого разрушения графита и дана полуэмпирическая формула для скорости разрушения графита. В экспериментах по имитации срывов плазмы в импульсном коаксиальном электродинамическом плазменном ускорителе исследованы продукты эрозии разных сортов графита (МПГ-8, РГТ и С-С-композита). Показано, что графит разрушается при тепловых ударах в значительной степени за счет растрескивания и эмиссии частиц.

Графитовые материалы рассматриваются сейчас как перспективные для дивертора, а может быть, и для экрана первой стенки термоядерного реактора токамака. В то же время актуальность проблемы срывов в токамаках делает актуальным изучение поведения графитовых материалов при срывах плазмы. Эрозия графитов при тепловых ударах существенно отличается от эрозии металлов, для которых основным механизмом является испарение с поверхности (в большинстве случаев расплавленной поверхности). Анализ косвенных данных [1-5] о разрушении графита при тепловом ударе показал, что графитовые материалы в отличие от металлов, во-первых, не плавятся, а во-вторых, растрескиваются и крошатся при тепловых импульсных нагрузках.

В предлагаемой работе предложена модель хрупкого разрушения графита и дана полуэмпирическая формула для скорости разрушения графита. Затем в экспериментах по имитации срывов плазмы в импульсном коаксиальном электродинамическом плазменном ускорителе исследованы продукты эрозии разных сортов графита (МПГ-8, РГТ и С-С-композита). Показано, что графит разрушается при тепловых

ударах в значительной степени за счет растрескивания и эмиссии частиц.

О преобладающей роли растрескивания графита и эмиссии крупных частиц говорят следующие факторы.

1. Сравнение глубины эрозии графитов при лазерных экспериментах [3] с расчетом максимальной глубины испаренного слоя ($x_{\max} = E/NH$, где E — плотность энергии на единицу поверхности, N — число атомов в единице объема мишени, H — теплота испарения в расчете на один атом) показывает, что реально, в экспериментах, с поверхности удаляется слой значительно больше, чем x_{\max} .

2. Температура поверхности T_s , измеренная во время облучения графита плазменным потоком, не превышает 300°C [4]. При такой температуре эрозия поверхности за счет испарения пренебрежимо мала [5].

3. Из экспериментов по лазерному тепловому удару [6] также следует, что температура поверхности недостаточна для интенсивного испарения. Максимальная энергия уносимая с эродируемым слоем в расчете на один атом составляет

$$CT_{\max} = E/Nx, \quad (1)$$

где $C = 3$ — теплоемкость, x — толщина уносимого слоя.

Экспериментальная величина $CT_{\max} = 1 \text{ эВ}$, что значительно ниже теплоты сублимации. Для одноатомного испарения $H_1 = 169 \text{ ккал/моль} = 7.1 \text{ эВ/атом}$, для двухатомного испарения $H_2 = 196 \text{ ккал/моль}$. В среднем обычно принимается $H = 5 \text{ эВ/атом}$. Точнее температуру поверхности можно оценить, если учесть глубину прогретого слоя $(4ct)^{1/2}$, c — коэффициент температуропроводности, в интересующем нас интервале температур $c = 0.1-0.2 \text{ см}^2/\text{с}$, t — длительность импульса. Тогда

$$T_s = E/CN \sqrt{x^2 + 4ct}, \quad (2)$$

что согласуется с прямыми измерениями температуры [4].

4. Электронно-микроскопические исследования графитовых материалов после воздействия на них потоков плазмы [4] также свидетельствуют о растрескивании и выкрашивании этих материалов при тепловых ударах. Все эти факты свидетельствуют о малой роли испарения с поверхности и указывают на то, что эрозия осуществляется достаточно крупными кусками материала, на отрыв которых тратится значительно меньше энергии, чем на их нагрев. Наиболее простое предположение — это отрыв отдельных кристаллических зерен. Обычно конструкционные графиты — это мелкокристаллические вещества с размером зерен $L = 10^{-5}-10^{-3} \text{ см}$. Приведенные ниже рассуждения позволяют предположить, что возможно также отрыв и кусков из нескольких зерен.

Наиболее естественное предположение — это растрескивание материала в результате термоупругих напряжений. Обычно критерий разрушения берется в виде равенства термонапряжения $E\alpha T_s$ (E — модуль Юнга, α — коэффициент линейного расширения) и предела прочности материала σ [6]. Однако, как показывают сравнения с экспериментом [6], скорость эрозии разных графитов слабо коррелирует с

параметром $E\alpha/\sigma$ или с параметром $E\alpha\sqrt{\sigma c}/\sigma$, который учитывает теплопроводность, т.е. температуру мишени. Следует также отметить, что температура, необходимая для разрушения T_c , определенная из соотношения

$$T_c = \sigma/E\alpha, \quad (3)$$

при паспортных значениях предела прочности графитов σ оказывается слишком низкой, порядка нескольких сот градусов.

Существуют теории разрушения хрупких материалов, основанные на критериях распространения трещины под действием приложенных напряжений [7,8]. Критерии разрушения дают связь между напряжением (либо сжатия σ_c , либо растяжения σ_t в зависимости от моды разрушения) и длиной трещины d . Во всех случаях $\sigma \sim \sqrt{d}$. Если принять, что минимальная длина трещины, требуемая для разрушения, порядка размера зерна $d = L$, то отсюда следует, что крупнозернистые графиты разрушаются легче. В то время как эксперимент [3] дает обратную тенденцию — легче разрушаются мелкозернистые графиты.

Все теоретические модели разрушения предполагают, что после достижения условия разрушения материала разрываются все межзеренные связи и материал рассыпается на зерна. Скорость распространения трещины s обычно всего в несколько раз меньше скорости звука, т.е. $s = 10^5$ см/с. Поскольку s больше скорости тепловой волны $\sqrt{c/t}$ уже при $t > c/s^2 = 10^{-10}$ с, то при таком предположении время отрыва зерна t_3 определялось бы только временем его прогрева $t_3 = L^2/4c = 10^{-10}$ с, а скорость движения границы разрушаемого материала была бы

$$u = L/t_3 = 4c/L. \quad (4)$$

Хотя такое выражение для скорости и дает правильную зависимость (уменьшение скорости эрозии при увеличении размеров зерен), но величина скорости $u = 10^4-10^5$ см/с оказывается значительно выше, чем наблюдается в эксперименте. Из данных [3] следует $u = x/t = 1-10^2$ см/с.

Совокупность приведенных фактов позволяет предположить, что отрываются только некоторые зерна или разрываются только некоторые межзеренные соединения, причем определяющим является взаимная ориентация зерен. Соседние зерна одинаковой ориентации расширяются при равномерном нагреве одинаково и на их границе не возникает больших напряжений. Если зерно имеет n соседних зерен, то при хаотическом расположении (изотропные графиты) зерен вероятность соответствующих условий для отрыва зерен будет $\sim (\Omega/2\pi)^n$, где Ω — телесный угол между ориентациями соседних зерен, больше которого происходит разрыв зерен. Для отрыва всех зерен слоя толщиной L нужно, чтобы трещина прошла гораздо большее расстояние. При линейном характере движения трещины это расстояние $L(\Omega/2\pi)^n$, а скорость движения поверхности равна

$$u \cong s(\Omega/2\pi)^n. \quad (5)$$

При "диффузионном" характере распространения трещины

$$u \cong s(\Omega/2\pi)^{2n}. \quad (6)$$

Реально, по-видимому, осуществляется некоторый средний закон движения трещины. Однако обе формулы при характерных значениях $n = 6$ и $\Omega = 1$ рад. дают $u = 10^{-1} - 10^{-2}$ см/с, что вполне охватывает интервал наблюдаемых значений u . Телесный угол Ω определяется разностью термоупругих напряжений между соседними зёрнами, т. е. анизотропией ($E\alpha$), а также разностью температур соседних зёрен, и в итоге зависит от температуры мишени T и ее градиента $\partial T/\partial x$. Естественно, что при очень больших T или $\partial T/\partial x$ $\Omega = 2\pi$ и материал рассыпается на отдельные зёрна. Однако в большинстве практически интересных случаев такой режим не достигается. К сожалению, получить конкретный вид функции $\Omega(T, \partial T/\partial x)$ пока невозможно и она определена эмпирически.

В предлагаемой модели понятно, почему анизотропные графиты разрушаются меньше [3]. Для зёрен, ориентированных преимущественно в одном направлении, вероятность “подходящей” для развала ориентации меньше, чем для хаотически расположенных зёрен, т. е. меньше, чем $(\Omega/2\pi)^n$, и в соответствии с (5) и (6) меньше скорость эрозии.

Если же графит имеет плавящиеся включения, например, карбид бора ($T_{пл} = 2400$), то трещина останавливается, дойдя до такого расплавленного включения. Это уменьшает разрушение боросодержащих графитов [4].

Паспортные данные о пределе прочности графита ориентированы на наиболее слабые межзёрновые связи, что отнюдь не совпадает с расположением зёрен “подходящей” ориентации, поэтому оценка T_c по формуле (3) не отражает условий разрушения графита при термоударе. Подобранное эмпирически значение $T_c = 2700$ К. Для практических расчетов предлагается наиболее простая формула, дающая зависимость $u(T, \partial T/\partial x)$ с минимальным числом подгоночных параметров, которые подбираются из всей совокупности имеющихся экспериментов. Это следующая формула:

$$u = u_0(T - T_c) + u_1 \partial T/\partial x. \quad (7)$$

Первый член описывает разрушение при равномерном нагреве поверхностного слоя до температуры T , большей некоторой критической T_c . Температуру T_c лучше всего определять из экспериментов, в которых измерялась мощность, начиная с которой происходит разрушение графита [9,10]. В этих экспериментах мощность была относительно невелика, поэтому второй член в (7) мал. Константа u_0 подбиралась из экспериментов [11] по лазерному тепловому удару, где определялась толщина уносимого слоя в зависимости от плотности выделенной энергии E и длительности импульса. Второй член в (7) описывает разрушение вследствие неравномерности нагрева поверхностного слоя. При плотности мощности, выделяемой на поверхности Q ,

$$\partial T/\partial x = Q/\kappa, \quad (8)$$

κ — теплопроводность.

Разность температур соседних зёрен $\Delta T \sim L \partial T/\partial x$, а термонапряжение, возникающее вследствие разности температур соседних зёрен, равно

$$E\alpha \Delta T = E\alpha L Q/\kappa. \quad (9)$$

Это напряжение достигает предела прочности σ при плотности мощности

$$Q = \kappa\sigma/\alpha EL. \quad (10)$$

Обычно это $Q = 10^6$ Вт/см². Однако, как показывает сравнение с экспериментом [11], второй член в (7) начинает "работать" уже при $Q = 10^5$ Вт/см². Это опять таки обусловлено более ранним разрывом связей между резноориентированными зернами. В результате скорость u нарастает с ростом Q плавно, а не взрывным образом при достижении порога мощности (10), как это было бы при разрыве все связей между зернами у поверхности. Константы u_0 и u_1 определялись подгонкой методом наименьших квадратов по эксперименту [10], где была получена зависимость толщины уносимого слоя от плотности энергии лазерного излучения при различных длительностях импульса. Получены значения

$$u_0 = 20 \text{ см/с} \cdot \text{эВ}, \quad u_1 = 0.1 \text{ см}^2/\text{с} \cdot \text{эВ}. \quad (11)$$

Это усредненные значения для нескольких сортов графита. Однако параметры u_0 и u_1 могут быть подобраны для каждого сорта графита.

Методика эксперимента

Эксперименты по имитации срывов плазмы проводились в импульсном коаксиальном электродинамическом плазменном ускорителе. Схема ускорителя представлена на рис. 1. Установка включает в себя следующие основные узлы: собственно ускоритель, плазмопровод, импульсный инжектор нейтрального рабочего газа, вакуумную систему, высоковольтную систему питания, коммутирующую аппаратуру, блоки синхронизации и диагностическую аппаратуру.

Электродинамический ускоритель плазмы состоит из двухэлектродной сборной шины и присоединенных к ней двух коаксиальных медных конических электродов, разделенных изолятором из оргстекла. Длина электродов равна 60 (внутреннего) и 65 см (внешнего), диаметр у основания внешнего электрода 30 см, внутреннего 20 см. Внешний электрод выполнен из медных прутков, расположенных по образующей конуса. Во внутреннем электроде имеется кольцевая щель, через которую в межэлектродный зазор с помощью импульсного инжектора подается рабочий газ. К сборной шине подсоединяются коаксиальные кабели, идущие от высоковольтных конденсаторов (типа ИМ-25-12) через вакуумные выключатели (разрядники). На земляном электроде сборной шины имеются посадочные места для вакуумноплотного присоединения плазмопровода. К тыльному торцу внутреннего электрода подсоединяется инжектор нейтрального газа.

Ускоренная плазма выбрасывается в плазмопровод, который представляет собой вакуумноплотную цилиндрическую камеру, пристыкованную к ускорителю. Рабочая часть плазмопровода имеет диаметр 300 см. К торцевой части плазмопровода пристыкована рабочая камера для размещения образцов. Камера откачивается до рабочего давления $10^4 - 5 \cdot 10^{-5}$ Тор. С целью увеличения производительности обработки за счет сокращения времени откачки при смене образцов рабочая камера отсекается от плазмопровода с помощью шибера с

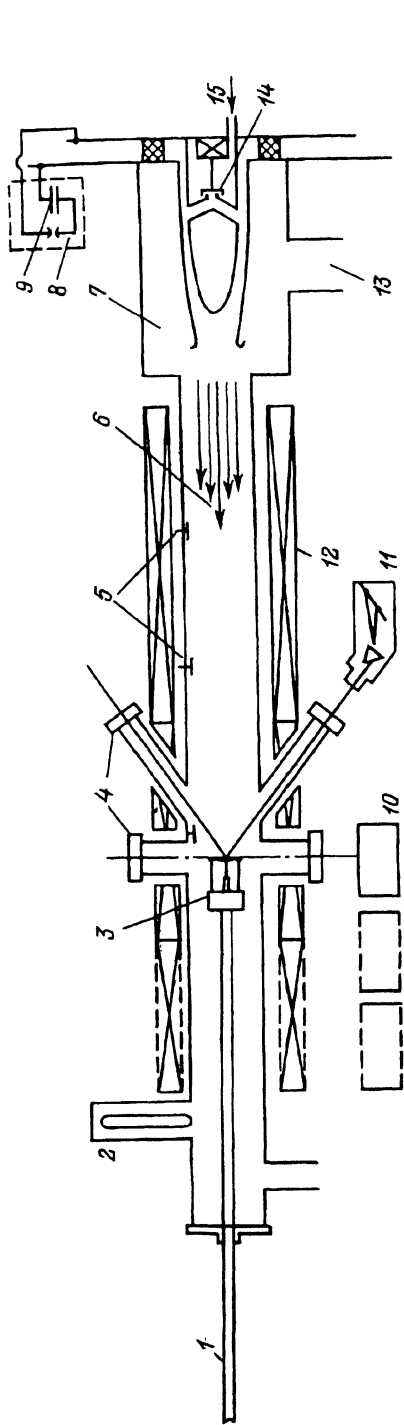


Рис. 1. Схема импульсного коаксиального ускорителя МКТ.

1 — подвижная штанга; 2 — затвор вакуумного шлюза; 3 — головка штанги с образцами, калориметрами, пьезокерамическими датчиками давления, электрическими и магнитными зондами; 4 — оптические окна; 5 — пристеночные магнитные зонды; 6 — плазмотрод; 7 — ускоритель плазмы; 8 — вакуумные разрядники; 9 — конденсаторная батарея ускорителя; 10 — прибор для регистрации видимого линейчатого и мягкого рентгеновского излучения, ИК полихроматор, интерферометр, схема лазерного рассеяния; 11 — ИК полихроматор; 12 — соленоиды; 13 — вакуумная откачка; 14 — газовый импульсный клапан; 15 — газовый ввод.

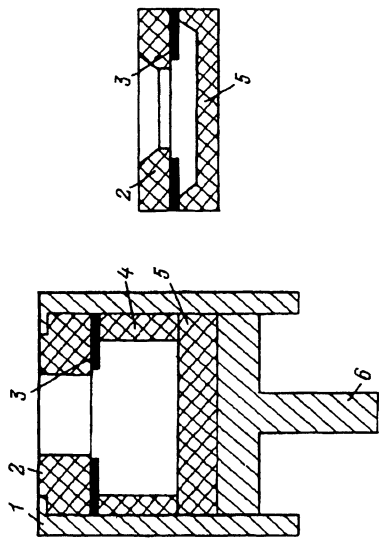


Рис. 2. Конструкция ловушки для сбора продуктов эрозии графитов при воздействии на них плазменного потока.

1 — защитный колпак; 2 — входная графитовая диафрагма, ограничивающая поток плазмы; 3 — сборники продуктов эрозии; 4 — защитное кольцо; 5 — мишень; 6 — основание.

электроприводом. При этом предусмотрена возможность автономной откачки рабочей камеры. Для уменьшения потерь плазмы на стенки вакуумная камера помещена в продольное магнитное поле, создаваемое двумя соленоидами, которые питаются от конденсаторных батарей (конденсаторы типа К41-И7). Амплитуда магнитного поля может варьироваться от нуля до 15 кГс.

Диагностическая аппаратура предназначена для выбора и контроля режима работы установки, а также для измерения параметров плазмы и температуры поверхности мишени. Она включает в себя пояс Роговского, делитель поверхности, магнитные зонды, датчики давления плазменного потока, калориметры и регистратор инфракрасного излучения с поверхности мишени. С помощью пояса Роговского измеряется разрядный ток в цепи электродинамического ускорителя плазмы. Делитель напряжения регистрирует поведение высокого напряжения на электродах ускорителя. Калориметры измеряют интегральную по времени плотность энергии потока струи. По осциллограммам давления оценивается длительность воздействия струи на образец. Система датчиков инфракрасного излучения, включая окна камеры и оптику, калибруется с помощью эталонной банд-лампы. Эти измерения дают возможность рассчитать температуру поверхности материала мишени. Магнитные зонды, представляющие собой плоские катушки, расположенные около стенки внутри вакуумной камеры и регистрирующие изменение ведущего магнитного поля при прохождении плазмы, позволяют измерять скорость плазменного сгустка в области расположения соленоида магнитного поля. Электрические сигналы регистрируются осциллографами, расположенными в пульту.

В предварительно откачанный межэлектродный зазор ускорителя с помощью импульсного электродинамического клапана напускается рабочий газ. Варьируя напряжение на батарее питания клапана, давление газа под клапаном и время задержки между началом срабатывания клапана и моментом подачи напряжения на электроды ускорителя (t_3) можно изменять конфигурацию распределения плотности газа в зазоре. При подаче высокого напряжения от конденсаторной батареи на внутренний электрод (катод) ускорителя происходит пробой промежутка и ионизация газа. На задней границе газового распределения формируется однородный токовый слой. Под действием сил магнитного давления $F = [i \times B]$ токовая перемычка начинает ускоряться вдоль электродов в направлении выходного торца электродной системы. При своем движении вдоль электродов токовая перемычка сгребает газ, напущенный в межэлектродный зазор, формируя плазменный сгусток, который через время ускорения ($t_{\text{уск}} \sim 10^{-5}$ с) вылетает из электродной системы ускорителя.

После вылета из ускорителя плазменный сгусток входит в продольное магнитное поле плазмопровода, где взаимодействует с поверхностью мишени. Магнитное поле плазмопровода обеспечивает поперечную изоляцию плазменного сгустка во время транспортировки.

Свойства плазменной струи можно охарактеризовать следующими параметрами: плотностью энергии, диаметром, распределением энергии по радиусу, направленной энергией ионов или скоростью струи и длительностью потока. Максимальная энергия ионов водорода в потоке 1.0–5 кэВ, температура электронов $T_e = 10–50$ эВ, плотность плазмы $\sim 10^{15}$ см $^{-3}$, плотность потока энергии в максимуме распре-

деления по радиусу 30–500 КДж/м², диаметр потока плазмы до 20 см, длительность потока 20–100 мкс.

Конструкция ловушки для сбора продуктов эрозии графитов при воздействии на них плазменного потока представлена на рис. 2 (в масштабе 2 : 1). Здесь 1 — стальной защитный колпак; 2 — входная графитовая диафрагма, ограничивающая поток плазмы; 3 — сборники продуктов эрозии (изготовлены из кремния, молибдена или из тонковолокнистого фильтра); 4 — защитное кольцо, изготовленное из того же графита, что диафрагма и мишень; 5 — мишень (МПП-8, пятимерный композит); 6 — основание (сталь). На этом же рисунке показана конструкция графитовой вставки, изготовленной из РГТ.

Облучение мишеней производилось водородной плазмой при плотности потока энергии 75, 250, 500 и 1000 КДж/м² за один импульс. Полное количество выстрелов по каждой мишени варьировалось от 2–15. В качестве исследуемых мишеней использовались графит марки РГТ, содержащий 7 вес. % Ti.

Для исследования продуктов эрозии графита после плазменного воздействия использовался метод отбора проб на волокна, применяемый при исследовании аэрозолей [12]. Метод основан на осаждении частиц на волокна с последующим прямым наблюдением волокон с осажденными на них частицами в просвечивающем электронном микроскопе. Метод позволяет определить морфологию частиц, а также их размер.

В данной работе продукты эрозии графита осаждались на волокна стекловолокнистого фильтра. Электронная микрофотография фильтра представлена на рис. 3. Как видно, фильтр представляет собой многослойную укладку гладких стеклянных волокон с диаметрами от десятков микрон до десятых микрона и менее. Толщина фильтра порядка 1 мм. В результате воздействия плазменных импульсных потоков на углеграфитовую мишень происходят ее эрозия и накопление графитового сублимированного и эродированного осадка на фильтре. Для исследования графитового осадка от фильтра отделялись слои,



Рис. 3. Электронная микрофотография фильтра из стекловолокна для сбора продуктов эрозии.

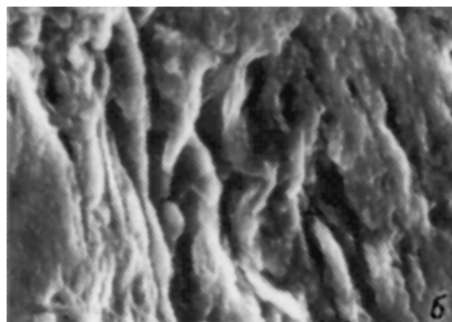
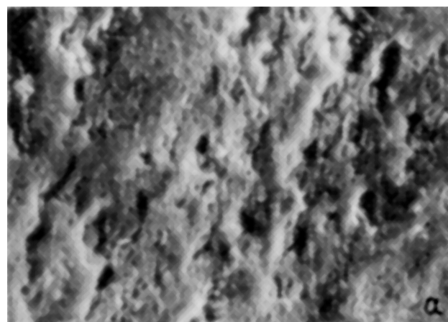


Рис. 4. Микроструктура поверхности графита МПГ-8 до (а) и после (б) воздействия импульсной водородной плазмы (10 импульсов) при плотности мощности 500 кДж/м^2 .

содержащие 2–3 укладки волокон с осажденными на них частицами графита, которые просматривались в просвечивающем электронном микроскопе ЭММА-4 при ускоряющем напряжении $U = 75 \text{ кв}$ методом теневого изображения. Размер частиц определялся прямым измерением их на микрофотографиях.

Поскольку в наших экспериментах размеры частиц заключены в интервале от 10^{-2} до $0.5 \cdot 10^2 \text{ мкм}$, то, чтобы построить графические распределения частиц по размерам, использовались измерения оптического микроскопа при увеличении $100\times$, электронного микроскопа при увеличении 350 и $7000\times$. Для того чтобы увеличить поле зрения, электронные микрофотографии дополнительно увеличивались.

Оптический и электронно-микроскопический диапазоны размеров частиц разделялись на шесть интервалов. В каждом интервале проводился подсчет количества частиц. Данные измерений размеров частиц воспроизведены в виде гистограммы.

Для выявления фоновой составляющей измерялась плотность частиц на фильтре, помещенном в камеру, но не облученном сгустками плазмы. Плотность частиц составляла 10^2 см^{-2} , размеры частиц в диапазоне от 1 до 20 мкм.

Структура поверхности исследуемых материалов после воздействия плазменных сгустков исследовалась с помощью сканирующего электронного микроскопа JEOL.

На рис. 4 представлена типичная микроструктура поверхности графита МПГ-8 после воздействия импульсного (10 импульсов) плазменного облучения при плотности мощности 500 кДж/м^2 . Видны трещины и сколы на облученной поверхности. Следует отметить, что анализ микроструктуры графитового лимитера после экспозиции в плазме токамака Т-10 в течение 2500 рабочих импульсов, включающих несколько сот импульсов со срывами, показал наличие на графите следов униполярных дуг, локализованных преимущественно на ионной стороне лимитера [13]. В отличие от этого в многочисленных экспериментах с различными сортами графита по моделированию срывов плазмы с помощью мощных плазменных потоков следы от дуг не были ни разу зафиксированы.

Электронные микрофотографии фильтра после облучения МПГ-8 в режиме 250 кДж/м^2 (10 импульсов) представлены на рис. 5, а, б. В

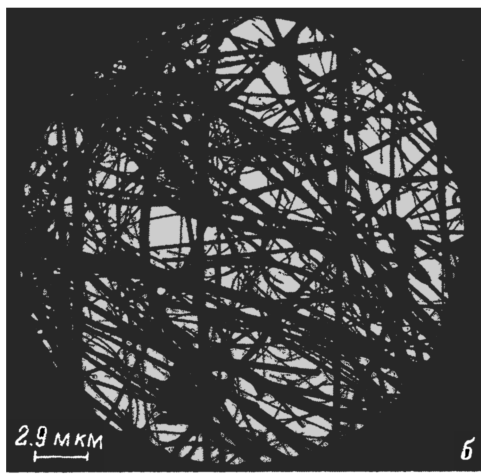
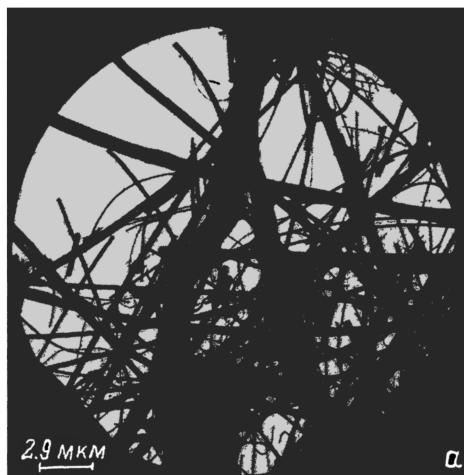


Рис. 5. Электронные микрофотографии фильтра с графитовым осадком графита МПГ-8 после облучения плазменными сгустками $W = 250 \text{ кДж/м}^2$, 10 выстрелов. *а* — ближняя часть фильтра, *б* — дальняя часть фильтра.

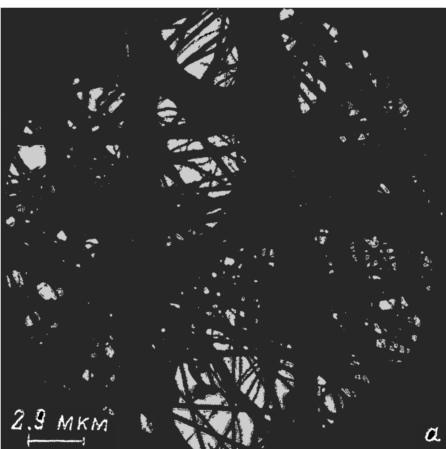


Рис. 6. Электронные микрофотографии фильтра с графитовым осадком графита МПГ-8 после облучения плазменными сгустками $W = 250 \text{ кДж/м}^2$, 15 выстрелов. *а, б* — разные увеличения.

приповерхностном слое фильтра обнаружено осаждение сублимированного графита в виде пленки, а также частиц размером от единиц до десятков микрон. Осаждение пленки идет избирательно по отдельным волокнам. Плотность частиц не превышает фоновую составляющую. Увеличение количества импульсов до 15 при той же мощности потока приводит к увеличению массы осажденного графита в приповерхностном слое фильтра (рис. 6, *а, б*). Ширина полос графитовой пленки составляет 8–12 мкм. На микрофотографиях выявлено также наличие конденсированной дисперсной фазы. Как видно из рис. 6, *б*, на одних волокнах присутствуют отдельные частицы, на других волокнах наблюдается накопление графита в виде осадка. Размер частиц составляет 0.02–0.06 мкм, их плотность $5 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2}$.

На рис. 7 представлены электронные микрофотографии фильтра с осадком после облучения графита МПГ-8 водородной плазмой с плотностью мощности 200 кДж/м^2 (10 импульсов). Как и при меньших интенсивностях плазменного пучка, в приповерхностном слое фильтра осаждается пленка. В нижележащем слое обнаружены частицы неправильной формы размером $10\text{--}40 \text{ мкм}$ (рис. 7,б). Плотность их превышает фоновую составляющую и равняется $7 \cdot 10^3 \text{ см}^{-2}$. При более тон-

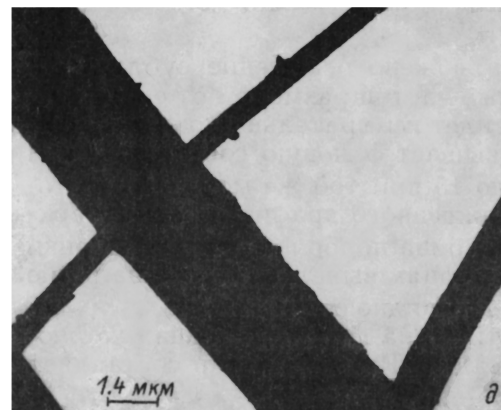
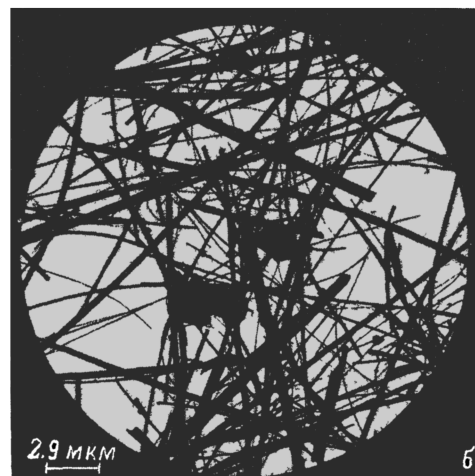
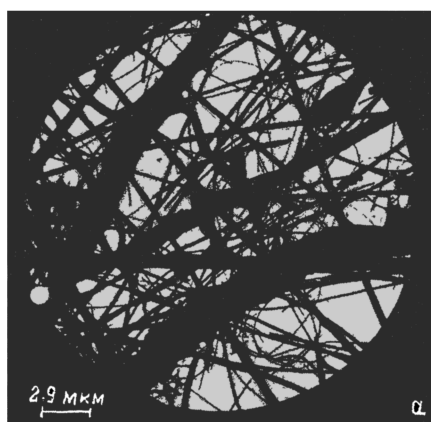


Рис. 7. Электронные микрофотографии фильтра с осадком графита МПГ-8 после облучения плазменными сгустками $W = 500 \text{ кДж/м}^2$, 10 выстрелов.

а — верхний слой пленки; б — нижележащий слой пленки; в, г — чешуйки; д — сферические частицы и пленка; е — мелкая пыль; ж — осколок переплавленного стекловолна с графитовым осадком.



Рис. 7 (продолжение).

ком электронно-микроскопическом анализе волокон фильтра (увеличение 7000 \times) на волокнах проявляются чешуйки размером 1.5–8.5 $\mu\text{м}$ (рис. 7, в, з). Кроме того, выявлены сферические частицы размером 1–2 $\mu\text{м}$ и пленка (рис. 7, д). Пленка прозрачна и практически незаметна. На отдельных волокнах конденсируются дисперсная фаза (рис. 7, е, ж). Размеры отдельных частиц, рассчитанных по этим микрофотографиям, составляют 0.02–0.06 $\mu\text{м}$. Следует отметить, что при плотности мощности 200 кДж/м² наблюдается переплав верхнего слоя волокон с графитовым осадком. Осколок переплавленного стекловолокна представлен на рис. 7, ж.

После облучения плазменным потоком в режиме 500 кДж/м², 2 имп. + + 1000 кДж/м², 4 имп. электронно-микроскопические изображения показали увеличение числа частиц в выше указанных размерных диапазонах по сравнению с данными приведенными на рис. 7 для плотности мощности 500 кДж/м². Наряду с этим на волокнах происходит осаждение большего количества очень мелких чешуек размером от 0.05–0.25 $\mu\text{м}$, которые в ранее исследованных режимах облучения

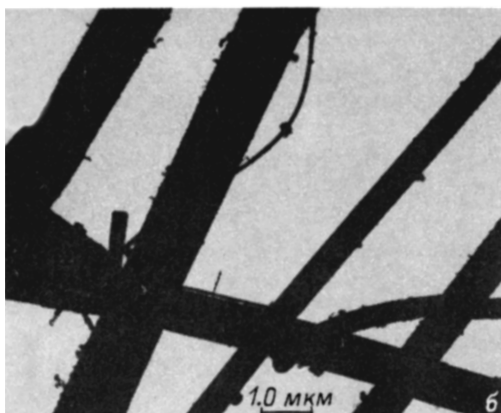


Рис. 8. Электронные микрофотографии фильтра с графитовым осадком графита МПГ-8 после облучения плазменными густками $W = 500$ кДж/м².

а — 2 импульса + 1000 кДж/м², б — 4 импульса.

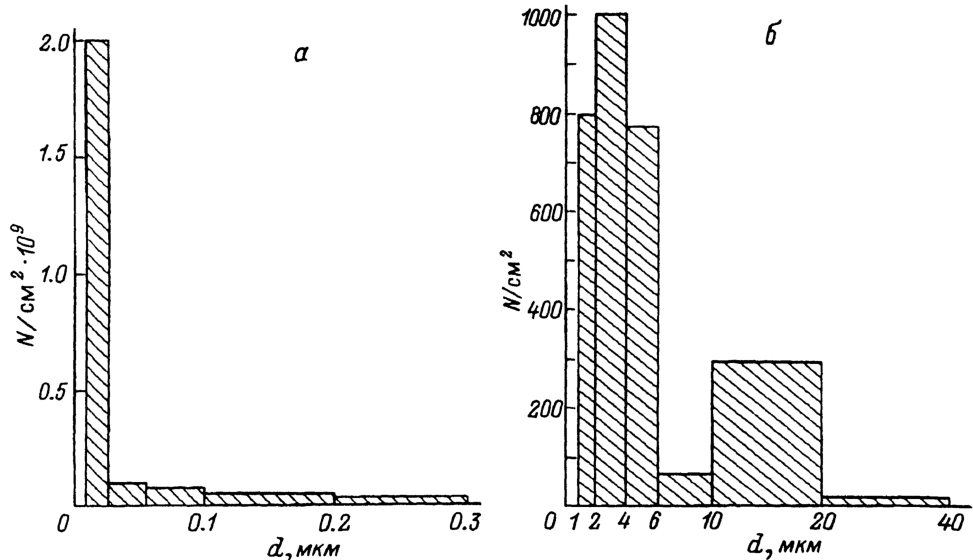


Рис. 9. Распределение частиц по размерам в осадке графита МПГ-8 после воздействия импульсной плазмы в интервале от 0.02 до 0.3 (а) и от 1 до 40 мкм (б).

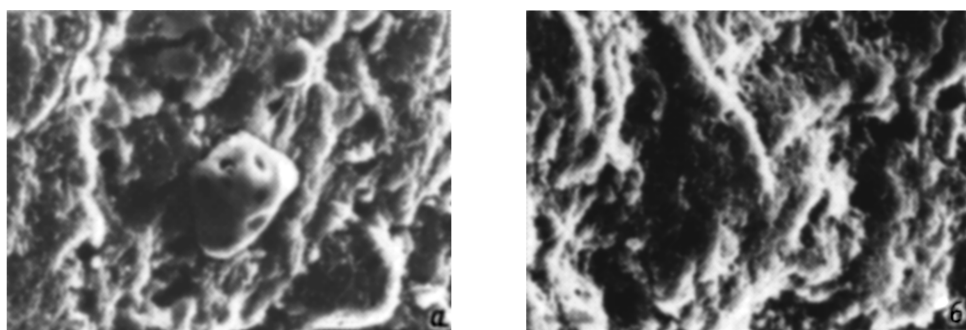


Рис. 10. Микроструктура поверхности графита РГТ до (а) и после (б) воздействия импульсной плазмы $W = 500 \text{ кДж/м}^2$, 10 выстрелов.

не наблюдались. Частицы слипаются и осаждаются на волокнах в виде печочечных агрегатов (рис. 8, а, б).

На рис. 9 представлено распределение частиц по размерам в интервале от 0.02 до 0.3 мкм (а) и от 1 до 40 мкм (б). Из рассмотрения графиков можно сделать вывод, что распределение частиц по размерам имеет 3 максимума. Первый максимум наблюдается в области 0.02–0.03 мкм, второй — в диапазоне 2–4 мкм, третий — в интервале 10–20 мкм. Плотность частиц размером 0.02–0.06 мкм составляет $3.7 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2}$, от 1 до 10 — $5 \cdot 10^2 \text{ см}^{-2}$, от 10 до 40 мкм — $7 \cdot 10^3 \text{ см}^{-2}$.

Таким образом, при взаимодействии мощных импульсных плазменных потоков с графитом МПГ-8 имеет место сублимация графита, а также эрозия графита в виде мелкой пыли, сферических частиц (1–2 мкм), чешуек (1.5–8.5 мкм), а также крупных осколков неправильной формы (10–40 мкм).

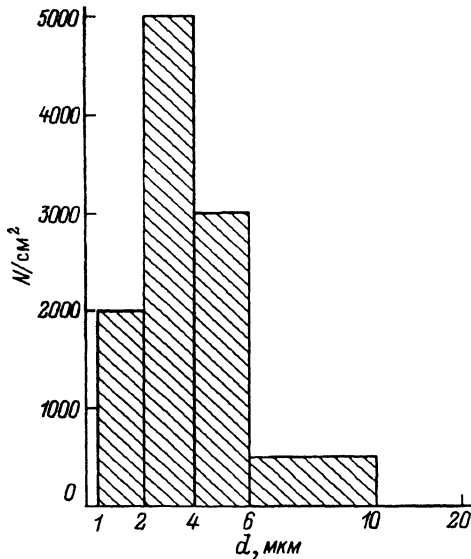


Рис. 11. Распределение частиц по размерам в осадке графита РГТ после воздействия импульсной плазмы.

Топография поверхности графита РГТ после облучения интенсивными импульсными потоками водородной плазмы (рис. 10, *a*) резко отличается от необлученной поверхности (рис. 10, *b*), а также от структуры облученного беспримесного графита МПГ-8 (рис. 4). Характерным для РГТ является появление на облученной поверхности большого количества мелких (от 1 мкм) и крупных (до 10 мкм) образований, испещренных порами. По-видимому, наблюдаемые особенности структуры поверхности графита РГТ обусловлены наличием Ti в графите образованием преципитатов TiC, их испарением и обратным осаждением на поверхности облучаемой мишени. Распределение частиц по размерам более 1 мкм представлены на рис. 11: распределение частиц менее 1 мкм совпадает с аналогичным распределением для МПГ-8. Сравнение графиков (рис. 9, *b* и 11) показывает, что максимум в распределении числа частиц графита РГТ совпадает с максимумом для МПГ-8, который находится в интервале 2–4 мкм, но максимума при 10–20 мкм для РГТ графита нет, а распределение частиц плавно убывает с ростом размера частиц. Плотность частиц для РГТ в указанном диапазоне размеров составляет $2 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$, т. е. существенно превышает плотность частиц в аналогичном размерном диапазоне для МПГ-8. Морфология этих частиц представлена на электронно-микроскопических фотографиях (рис. 12, *a–в*). Это — кристаллы чешуйчатой формы. Однако в отличие от МПГ-8 в осадке облученного РГТ более крупные частицы размером 20–40 мкм отсутствуют. Отсюда можно сделать заключение о дополнительном механизме эрозии в МПГ-8 по сравнению с РГТ, приводящем к разрушению графита в виде крупных чешуек. Таким механизмом эрозии графита МПГ-8 может быть хрупкое разрушение, которое менее ярко выражено у более пластичного РГТ, в состав которого входит Ti. Как показал оже-электронный анализ поверхностного слоя графита РГТ после облучения плазменными сгустками, его поверхностный слой обогащен титаном.

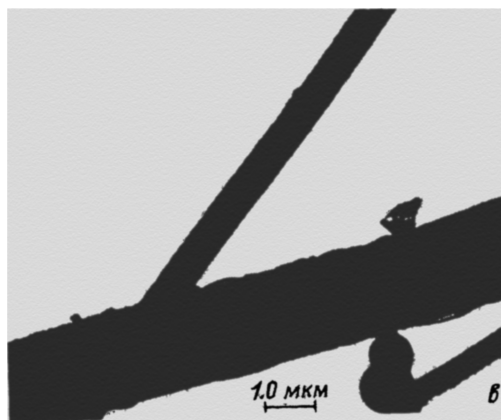
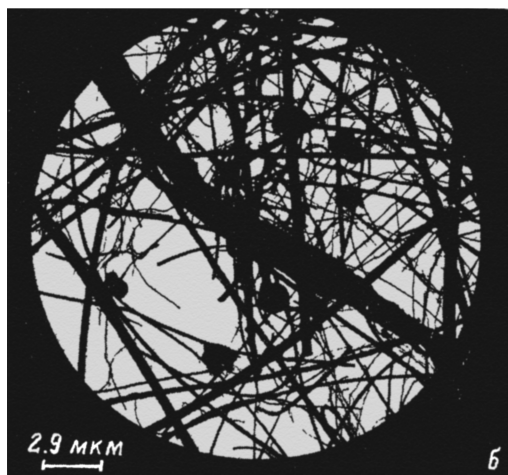
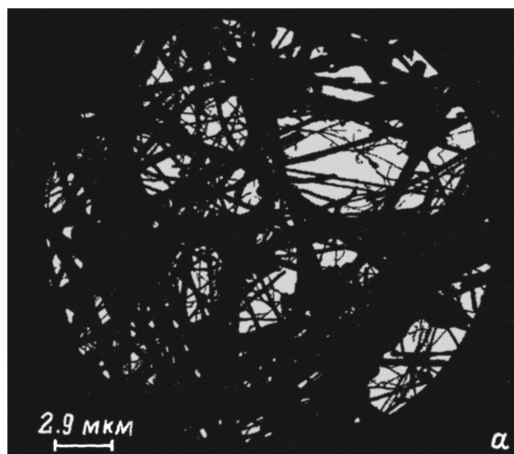


Рис. 12. Электронные микрофотографии фильтра с осадком графита РГТ после воздействия импульсной плазмы $W = 500 \text{ кДж/м}^2$, 10 выстрелов.

a — ближняя часть фильтра, *б* — дальняя часть, *в* — ближняя часть при большем увеличении.

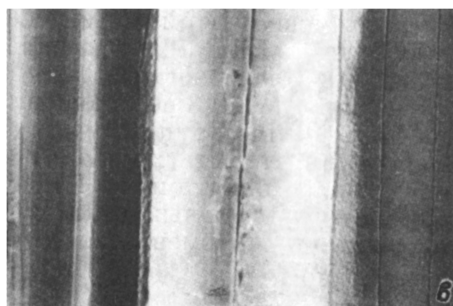
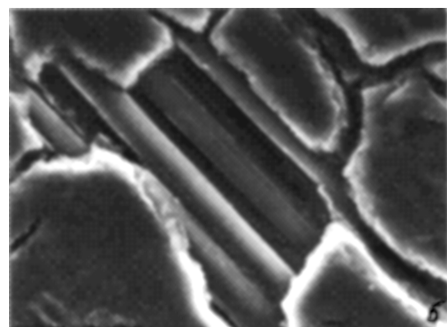
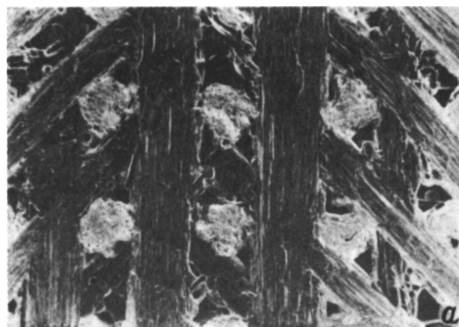


Рис. 13. Микроструктура поверхности С-С-композиита до (*a*) и после (*б, в*) воздействия импульсной плазмы $W = 500 \text{ кДж/м}^2$, 10 выстрелов.

a — ближняя часть фильтра, *б* — дальняя часть фильтра, *в* — ближняя часть фильтра с большим увеличением.

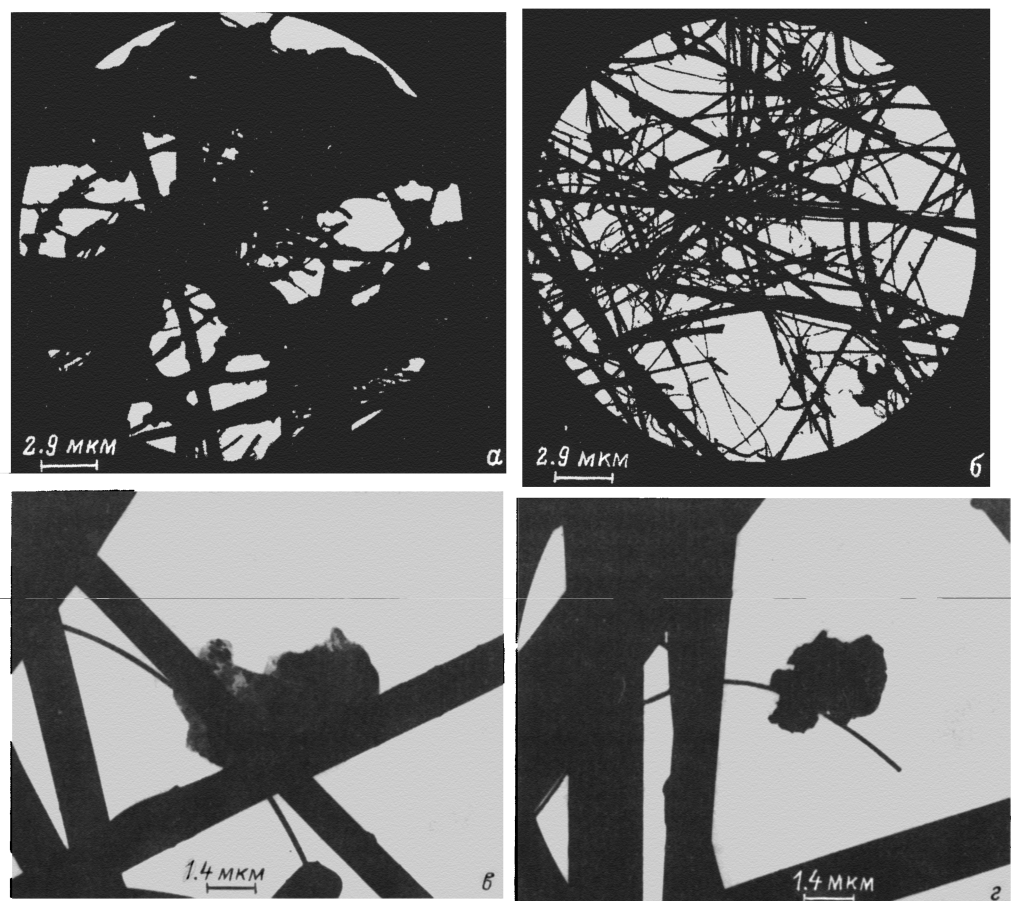


Рис. 14. Чешуйки на фильтре с осадком С-С-композиата.

Разные виды: а, б — меньшее увеличение, различные участки поверхности; в, г — большее увеличение. Всюду 10 выстрелов, $W = 500 \text{ кДж/м}^2$.

Микроструктура исследуемого С-С-композиата до и после взаимодействия с плазмой показана на рис. 13. В результате воздействия интенсивных плазменных потоков водорода существенное изменение претерпевает в основном матрица, состоящая из пиролитического углерода, который растрескивается и выкрашивается. Характерно, что структура армирующих волокон практически не изменяется, в результате распыления наблюдаются лишь очистка поверхности и ее сглаживание. Электронно-микроскопический анализ продуктов эрозии пятимерного С-С-композиата показал, что наблюдаются 2 сорта улавливаемых фильтром частиц с максимумами в интервалах $0.02\text{--}0.03$ и $2\text{--}4 \text{ мкм}$, причем обнаружены также чешуйки размером $\sim 40 \text{ мкм}$ (рис. 14). Распределение уловленных на стекловолокне частиц по размерам представлено на рис. 15.

Плотность частиц размером $10\text{--}20 \text{ мкм}$, осевших на фильтр в результате воздействия 6 импульсами плазменного потока с плотностью энергии 200 кДж/м^2 , составляет $5.2 \cdot 10^3 \text{ см}^{-2}$. Для сравнения укажем, что при аналогичном режиме облучения графитов МПГ-8 и РГТ плотность частиц указанных размеров равна $7.7 \cdot 10^3$ и $2 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$ соответственно.

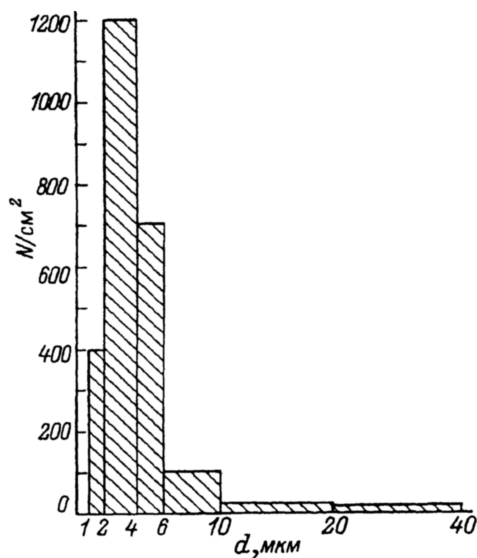


Рис. 15. Распределение частиц по размерам в осадке С-С-композита после воздействия импульсной плазмы.

В случае облучения С-С-композита на волокнах была зафиксирована конденсация сублимированного графита на волокне в виде игольчатых выступов (рис. 16), что, по-видимому, обусловлено ростом монокристаллов графита. Весьма интересная картина конденсации частиц размером 0.3–0.6 мкм, расположенных на равном расстоянии друг от друга, показана на рис. 17. Как видно, чем больше размер частиц, тем дальше они удалены друг от друга. Такой эффект может быть обусловлен наличием одноименного заряда у частиц и их электростатическим отталкиванием друг от друга.

Из [2] следует, что мелкие частицы размером меньше 10 мкм испаряются в плазме экранирующего пара. Таким образом, и напыленный слой графита есть результат испарения частиц графита, а не его поверхности, которая имеет температуру меньше 3000 К, что недостаточно для интенсивного испарения графита. Наблюдаемые в осадках



Рис. 16. Конденсация сублимированного С-С-композита на волокне в виде игольчатых выступов, $W = 500 \text{ кДж/м}^2$.



Рис. 17. Иллюстрация конденсации одинаковых по размерам частиц на фильтре, расположенных на равном расстоянии друг от друга при воздействии плазменных сгустков на С-С-композите.

частицы и чешуйки графита скорее всего эмитируются с периферии плазменного пучка или уже после окончания импульса и потому не испарились после эмиссии с поверхности.

Заключение

1. Разработана методика отбора проб и анализа продуктов эрозии и сублимации углеграфитовых материалов (УГМ) после облучения сгустками плазмы, которая заключается в осаждении продуктов эрозии УГМ на фильтре с последующим прямым наблюдением волокон фильтра с осажденными на них пленками и частицами в просвечивающем электронном микроскопе.

2. Метод позволил зарегистрировать частицы от 10^{-2} до 10^2 мкм и определить их морфологию.

3. На приемнике из стекловолокнистого фильтра зафиксированы помимо сублимированной пленки следующие продукты эрозии: частицы от 0.02 до 10 мкм, чешуйки размером от 0.05 до 0.25 и от 1.5 до 8.5 мкм, сферические частицы диаметром 1–2 мкм, цепочечные агрегаты из частиц, а также частицы в виде игольчатых выступов в случае С–С-композиата.

4. В распределениях частиц по размерам для всех сортов графита наблюдается максимум при 2–4 мкм. Для ПМГ-8 и С–С-композиата присутствуют частицы размером 20–40 мкм, которых нет у РГТ, что свидетельствует о большей хрупкости МПГ-8 и С–С-композиата.

5. При воздействии импульсного интенсивного плазменного потока на пятимерный С–С-композиат наблюдается сильная эрозия матрицы (растрескивание и выкрашивание), армирующие волокна подвержены в основном распылению. Данная методика перспективна и позволила показать наличие хрупкого разрушения графита. Она перспективна также для наблюдения кинетики поведения микрочастиц в больших плазменных объемах.

Два автора Ю.В. Мартыненко и П.Г. Московкин, частично поддержаны договором с МАГАТЭ, № 7686/RB.

Список литературы

- [1] Bolt H., Crossmann C.D., Miyahara A. et al. Preprint N IPPJ-AM-53. Nagoya (Japan), 1987.
- [2] Карлыханов Н.Г., Матвеев Ю.И., Мартыненко Ю.В. и др. Взаимодействие потока плазмы с твердотельной мишенью. В печати.
- [3] Bolt H. Material Response to Off-normal Heat Fluxes in NET/ITER. IAEA-AGM. Vienna, 1989.
- [4] Guseva M.I. Interaction of Ion and Plasma Beams with Carbon Material. IAEA-AGM. Vienna, 1991.
- [5] Martynenko Yu.Y., Moscovkin P.G. Shielding of Tokamak Wall by Vapour during Plasma Disruption. IAEA-AGM. Vienna, 1991. ВАНТ. 1991. Вып. 4. С. 17–21.
- [6] Bolt H., Groessman C.D. et al. Preprint N IPPJ-AM-53. Nagoya (Japan), 1987.
- [7] Wiederhorn S.M., Fuller E.R. // Mat. Sci. and Eng. 1985. Vol. 71. P. 169.
- [8] Meln S. // Int. J. of Estructure. 1986. Vol. 30. P. 103.
- [9] Bolt H. et al. // Fusion Eng. and Desing. 1989. Vol. 9. P. 33–38.
- [10] Burtseva T.S. et al. JCERM. Florida (USA), 1991. To be published J. of Nucl. Mat.
- [11] Van der Laan J.G.
- [12] Schafer H.J., Pfeifer H.G. // Part. Syst. Charact. 1988. Vol. 5. P. 174–178.
- [13] Barsuk V.A., Buzhinsky O.I., Guseva M.I. et al. // J. Nucl. Mater. 1992. Vol. 191–194. P. 1417.