

облучении. Влияние кристаллографической ориентации поверхности монокристаллов на степень блистерообразования и эрозию материала отмечено, например, в работах [2, 5]. Анизотропия радиационной эрозии зерен с различной кристаллографической ориентацией также наблюдается при анализе микроструктур облученной поверхности в тройной точке (см. рис. б и в). Видно, что характер разрушения и эрозия существенно изменяются при переходе от одного зерна к другому. Рассчитанные коэффициенты эрозии равны  $(0,31 \pm 0,09)$ ,  $(0,07 \pm 0,02)$  и  $(0,24 \pm 0,07)$  атом/ион для зерен 1, 2 и 3 соответственно (см. рис. в).

Таким образом, исследования настоящей работы показывают, что с практической точки зрения для изготовления конструктивных элементов разрядных камер термоядерных реакторов молибденовый сплав ЦМ-6 целесообразно использовать в деформированном состоянии (после

теплой прокатки) с доминирующей текстурой в плоскости {001}.

Авторы благодарят А. Ф. Сорокина за помощь при электронно-микроскопическом исследовании образцов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Davis J., Kulcinsky G. «Nucl. Fusion», 1976, v. 16, № 2, p. 355.
2. Das S., Kaminsky M. «Advances Chem.», 1976, N 158, p. 112.
3. Евстюхин А. И. и др. «Физика и химия обработки материалов», 1976, № 3, с. 149.
4. Моргунова Н. Н. и др. Сплавы молибдена. М. «Металлургия», 1975.
5. Гусев В. М. и др. [3], 1978, № 3, с. 9.

Поступило в Редакцию 29.10.79

УДК 621.039.531

## Блистеринг материалов при циклическом облучении в широком спектре углов падения ионов

КАЛИН Б. А., КОРШУНОВ С. Н., СКОРОВ Д. М., ЯКУШИН В. Л.

Первая стенка разрядной камеры и другие узлы термоядерного реактора в процессе его работы будут подвергаться интенсивному облучению ионами изотопов водорода и гелия с широким спектром углов падения и энергии. Взаимодействие плазмы с конструктивными материалами приводит к их эрозии и загрязнению плазмы тяжелыми примесями вследствие катодного распыления и блистеринга. В настоящее время широко изучается блистеринг материалов, перспективных для использования в таком реакторе. Однако большинство исследований выполнено при облучении мишеней моноэнергетическими пучками при нормальном падении ионов. Только в работах [1] и [2] изучено блистерообразование при моделировании энергетического спектра ионов гелия, близкого к ожидаемому в термоядерном реакторе. Целью настоящей работы является исследование блистеринга при циклическом облучении мишеней в широком спектре углов падения ионов — от нормальных к поверхности до скользящих.

Для получения широкого спектра углов падения ионов было изготовлено устройство к приемнику масс-монохроматора, позволяющее в процессе бомбардировки вращать мишень с постоянной скоростью вокруг оси, перпендикулярной к падающему пучку ионов (рис. 1). Устройство состоит из корпуса 4, ланок 1 и 13 с держателями для образцов 9, 11; двигателя 12, системы зубчатых колес 2, 3,

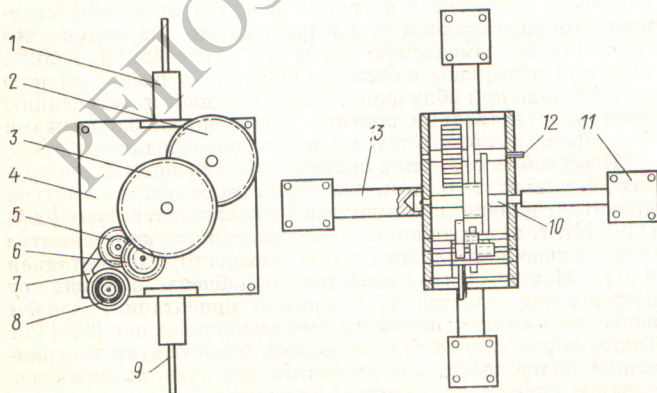
5, 6 и системы, обеспечивающей равномерность и заданный ход вращения вала 10. Двигатель пружинного типа посредством зубчатого колеса 2 передает вращение на основную вал, равномерность вращения которого осуществляется с помощью зубчатой пары 5, 6 и ограничителя 7, передающего в обратном порядке колебания маятника 8, закрученного в виде спирали. Весь механизм смонтирован внутри корпуса, прикрепленного к вводу вращения приемника масс-монохроматора, что позволяет вводить под пучок ионов поочередно образцы, закрепленные на держателях.

При непрерывном вращении мишени материалы облучаются в циклическом режиме и в широком интервале углов падения ионов, что обеспечивает плавное изменение проекции средней длины пробега ионов  $R_p$  в мишени от нуля до максимального значения, соответствующего его глубине проникновения ионов при данной энергии. В течение первого полупериода цикла ( $T = 40$  с) облучается образец, закрепленный на одной стороне вращающегося держателя 9, во время второго полупериода бомбардируется мишень на другой стороне держателя. За время одного полупериода угол падения ионов  $\alpha$  (угол между плоскостью образца и падающим пучком) изменяется от 0 до 180°. На рис. 2 приведен график, описывающий характер и параметры циклического облучения. Распределение падающих ионов гелия по углам может быть выражено формулой

$$\Phi = \Phi_0 \sin \alpha.$$

В работе был исследован блистеринг вакуумно-плавленного молибдена марки МЧВП и ванадия электронно-лучевой плавки марки ВЭЛ-2. Материалы облучали ионами гелия энергией 20 кэВ при температуре мишеней, близкой к комнатной, дозой  $2 \cdot 10^{18}$  ион/см<sup>2</sup>. Более детально условия ионной бомбардировки описаны в работе [3]. Поверхность образцов после ионной имплантации исследовали на электронном микроскопе ЭВМ-100Л при помощи угольных реплик, оттененных хромом. По результатам электронно-микроскопического изучения определяли параметры блистеров и коэффициенты эрозии вследствие их разрушения.

Результаты исследования поверхности материалов, облученных ионами гелия в стационарном положении (бомбардировка ионным пучком, перпендикулярным к поверхности) и при вращении мишени, показали, что при одинаковых условиях ионной бомбардировки вращение образцов приводит к изменению параметров блистеров



Р и с. 1. Устройство для циклического облучения образцов в широком спектре углов падения ионов

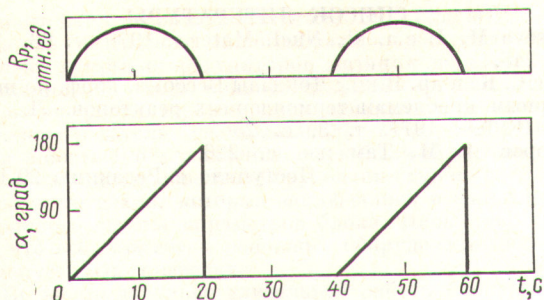


Рис. 2. Характер и параметры циклов ионного облучения

и коэффициентов радиационной эрозии по сравнению со стационарным положением мишени.

На рис. 3 представлены типичные электронно-микроскопические снимки облученной поверхности и гистограммы распределения блистеров по размерам для молибдена марки МЧВП после облучения в стационарном положении и при вращении мишени. Как видно из рис. 3, а, в, несмотря на то, что в обоих случаях форма распределения блистеров по размерам имеет одинаковый вид с двумя хорошо выраженными максимумами, которым соответствуют средние размеры ( $d \approx 0,1-0,2$  и  $0,8-1,1$  мкм), при бомбардировке вращающихся образцов наблюдаются некоторые особенности. Во-первых, если средний размер блистеров первого пика остается практически постоянным, то для больших вздутый средний размер уменьшается

с 1,1 до 0,85 мкм. Во-вторых, плотность мелких блистеров уменьшается с  $10,8 \cdot 10^8$  до  $5,6 \cdot 10^8$  блистеров/см<sup>2</sup>, а плотность вздутый со средними размерами от 0,3 до 1,3 мкм заметно возрастает, что приводит к увеличению площади поверхности, занятой блистерами, с 68 до 95%. В-третьих, на образцах, облученных в широком спектре углов падения ионов, отсутствует «хвост» в распределении вздутый по размерам (см. рис. 3, в). Так, если в стационарном положении мишени размер блистеров достигает 2,6 мкм, то при вращении обнаружены блистеры, максимальный размер которых 1,6 мкм.

Такие изменения в распределении блистеров по размерам, вероятно, связаны с тем, что при бомбардировке вращающейся мишени внедренный газ распределяется ближе к облучаемой поверхности и более симметрично относительно среднего значения проекции пробега ионов. Это хорошо подтверждается гистограммами (см. рис. 3, а и в), а также тем, что толщина крышек разрушенных блистеров при облучении материалов в широком спектре углов падения ионов уменьшается с  $0,96 \cdot 10^{-7}$  до  $0,52 \cdot 10^{-7}$  м и с  $1,13 \cdot 10^{-7}$  до  $0,64 \cdot 10^{-7}$  м для молибдена марки МЧВП и ванадия ВЭЛ-2 соответственно.

Кроме изменений в распределении блистеров по размерам и плотности установлено, что при бомбардировке вращающейся мишени уменьшается коэффициент радиационной эрозии поверхности вследствие разрушения блистеров. Так, для молибдена, облученного дозой  $2 \cdot 10^{18}$  ион/см<sup>2</sup>, площадь отщепленных крышек снижается с 9,3 до 3,2%, а коэффициент эрозии с  $3 \cdot 10^{-2}$  до  $0,6 \cdot 10^{-2}$  атом/ион. Уменьшение радиационной эрозии, вероятно, связано с тем, что, как было показано, при вращении мишени

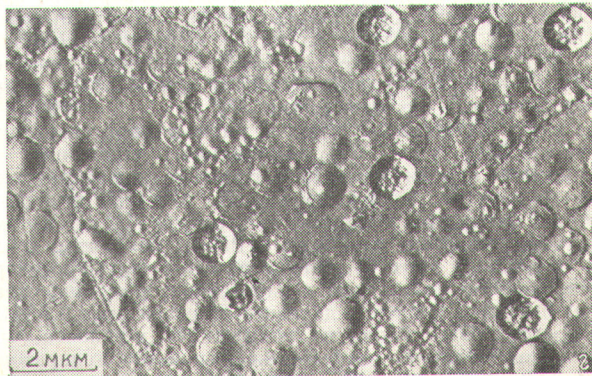
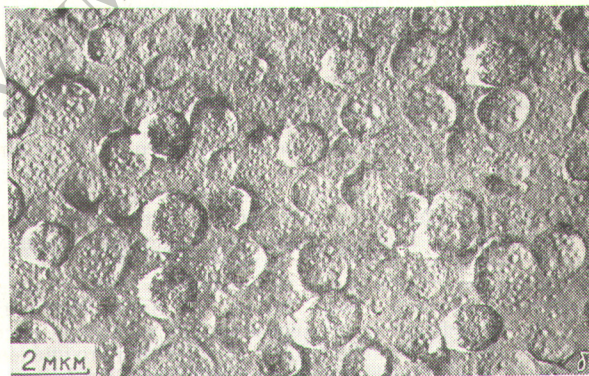
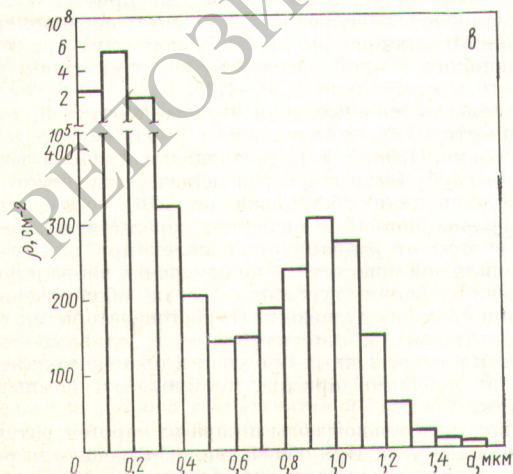
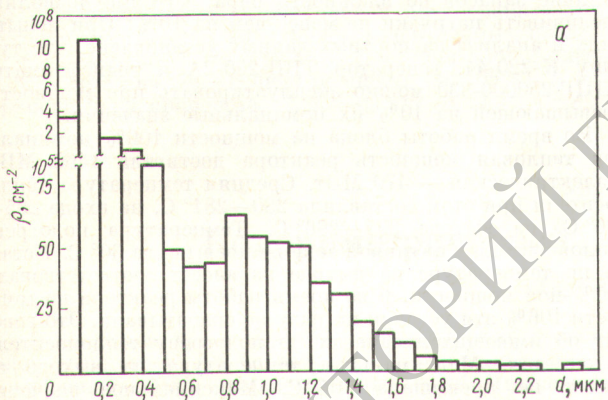


Рис. 3. Гистограммы распределения блистеров по размерам и электронно-микроскопические снимки поверхности молибдена марки МЧВП: а, б — стационарное положение мишени; в, г — вращающаяся мишень

снижается средний размер блистеров и почти в два раза уменьшается толщина их крышек.

Таким образом, исследования настоящей работы показали, что облучение материалов в циклическом режиме и широком спектре углов падения ионов приводит к уменьшению эрозии поверхности материалов вследствие разрушения блистеров и изменению параметров блистерообразования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Guseva M. I. e.a. «J. Nucl. Mater.», 1976, v. 63, N 1, p. 245.
2. Дас С. К. и др. В кн.: Доклады Всесоюз. конф. по инженерным проблемам термоядерных реакторов. Л., изд. НИИЭФА, 1977, т. 3, с. 256.
3. Скоров Д. М. Там же, с. 226.

Поступило в Редакцию 29.10.79

УДК 621.039.5.56

## Опыт эксплуатации Кольской АЭС на повышенной мощности

ВОЛКОВ А. П., ТРОФИМОВ Б. А., САВЧУК Ю. И., ЗВЕРКОВ В. В., ИГНАТЕНКО Е. И., ЛИТВИНОВ А. Н.

Первая очередь (два блока) Кольской АЭС была введена в эксплуатацию в 1974 г. Анализ основных параметров и режимов работы АЭС в процессе эксплуатации указывал на наличие некоторых запасов по мощности в оборудовании всей технологической схемы станции, что позволило в течение 1976—1977 гг. доказать возможность некоторых экспериментальных выводов обоих блоков на повышенную мощность и осуществить это по разрешению контролирующей организации.

Формирование мощности энергоблоков проводилось поэтапно на 2—4, 6 и 7%. В течение октября — декабря 1976 г. первый блок Кольской АЭС работал на мощности, на 2—4% превышающей номинальную, в течение 50 эф. сут на второй топливной загрузке. К началу работы на повышенной мощности реактор проработал 220 эф. сут. В исходном состоянии блок продолжительное время работал на номинальной мощности. Коэффициент неравномерности мощности кассет при этом не превышал 1,30 (при высоте положения регулирующей группы от низа активной зоны  $H_6 = 130$  см). На этот же момент кампании была отмечена хорошая сходимость расчетных коэффициентов неравномерности в мощности кассет с данными эксплуатации. Коэффициент неравномерности нейтронного поля по высоте активной зоны составил 1,35 при  $H_6 = 147$  см. При увеличении положения высоты регулирующей группы до 208 см эти коэффициенты неравномерности уменьшились соответственно до 1,27 и 1,19 при работе реактора на номинальной мощности.

При эксплуатации блока на мощности 104% тепловая мощность достигала 1430 МВт, а электрическая — 460 МВт. Коэффициент неравномерности мощности кассет при  $H_6 = 220$  см составил 1,32; в дальнейшем это значение снижалось в процессе выгорания топлива. Коэффициент неравномерности нейтронного поля по высоте активной зоны составил 1,23 при  $H_6 = 184$  см и концентрации борной кислоты в теплоносителе 0,3 г/кг. Температура подогрева теплоносителя в активной зоне реактора не превышала 29,8°С; температура на входе в реактор составила 266—267°С, а на выходе 295—296°С. Максимальная температура теплоносителя на выходе из максимально нагруженной кассеты не превышала 304°С.

Расход питательной воды и пара в парогенераторах достигал 2800 т/ч (105% номинального значения). Это не является ограничением по расходным характеристикам второго контура. Удовлетворительно работали при повышенных нагрузках основные регуляторы блока: автоматический регулятор мощности (АРМ-4), регулятор давления по первому контуру, регуляторы питания парогенераторов, регуляторы уровня в парогенераторах, подогревателях высокого и низкого давления и деаэраторах 0,6 МПа. Во время работы блока на повышенной мощности были проведены тепловые испытания основных генераторов № 1 и 2. Активная нагрузка на генераторах составила 455 МВт. Результаты испытаний показали, что все параметры находятся в допустимых пределах.

С 15 января по 2 июня 1977 г. второй блок Кольской АЭС работал на мощности 106% номинальной. Перед этим

блок проработал 83 эф. сут от начала топливного цикла, а непосредственно перед выходом на повышенную мощность работал в течение месяца на номинальной мощности. Максимальная температура теплоносителя на выходе из кассет при эксплуатации на номинальном уровне мощности 301°С (координата 17—32); максимальное значение коэффициента неравномерности мощности кассет составляло 1,28, а максимальное значение коэффициента неравномерности нейтронного поля по высоте активной зоны — 1,25. Перед выходом блока на повышенную мощность были проанализированы результаты измерений наиболее важных параметров, которые могли бы препятствовать увеличению мощности. Было обнаружено, что минимальный расход теплоносителя через кассеты превышает на 6—7% допустимое значение и не является ограничивающим фактором. Сепарационные испытания парогенераторов показали наличие запасов по влажности пара, которые позволяют увеличивать нагрузку не менее чем на 10%. При испытаниях и анализе паспортных данных установлено, что турбину К-220-44, генератор ТВВ-220-2А и трансформатор ТДЦГ-250000-330 можно эксплуатировать при мощности, превышающей на 10% их номинальные значения.

Во время работы блока на мощности 106% номинальной тепловая мощность реактора достигала 1460 МВт, а электрическая — 470 МВт. Средняя температура теплоносителя при этом составляла 280—281°С, а на входе 265—266°С, а на выходе 295—296°С. Температура подогрева теплоносителя в активной зоне не превышала 30°С. Уставки по температуре на выходе из кассет соответствовали 100%-ной мощности, и во время работы реактора на мощности 106% эти уставки ни разу не срабатывали. Это говорит об имеющихся запасах по подогреву теплоносителя в кассетах. Максимальная температура на выходе из кассет не превышала 304°С. Максимальное значение коэффициента неравномерности в начальный период 1,30 и в дальнейшем уменьшалось до 1,27 при  $H_6 = 200$  см. Максимальное значение коэффициента неравномерности нейтронного поля по высоте активной зоны практически не изменялось в процессе работы на повышенном уровне мощности и составляло 1,20—1,25.

Активность теплоносителя первого контура при работе на мощности 106% номинальной в 30 раз меньше допустимого уровня. Выбросы радиоактивных газов в вентиляционную трубу были в 400 раз меньше допустимого уровня. Радиационная обстановка на АЭС соответствовала нормам радиационной безопасности, значительно не отличаясь при этом от радиационных полей при работе блока на номинальной мощности. При измерении вибрации основного оборудования турбинного цеха обнаружено, что вибрация этого оборудования (турбогенераторы, питательные электронасосы, конденсатные и сливные насосы) находится в разрешенных пределах и практически не отличается от вибрации при работе блока на номинальной мощности.

Расход питательной воды и пара из парогенераторов не превышал 2880 т/ч. При общей тепловой мощности реактора 106% тепловая мощность отдельного максимально нагру-