#### УДК 543.4

# ОЧИСТКА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛ СИСТЕМ ОПТИЧЕ-СКИХ ДИАГНОСТИК НА ИТЭР ИЗЛУЧЕНИЕМ ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА

А.П. Кузнецов<sup>1</sup>, А.С. Александрова<sup>1</sup>, О.И. Бужинский<sup>2</sup>, К.Л. Губский<sup>1</sup>, Т.В. Казиева<sup>1</sup>, А.В. Савченков<sup>1</sup>, С.Н. Тугаринов<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, Москва, Троицк, Россия

Представлены результаты экспериментальных исследований эффективности очистки металлических зеркал от плёнок сложного состава импульсным излучением волоконного лазера. Показано, что подбором режимов воздействия излучения на поверхность с напылённой плёнкой можно восстановить исходные отражательные характеристики оптических элементов. При этом эффективная очистка осуществляется излучением с плотностью мощности менее 10<sup>7</sup> Вт/см<sup>2</sup>. При такой относительно малой плотности мощности удаление загрязнений происходит в твёрдой фазе, вследствие чего термическое воздействие на зеркало оказывается незначительным.

Ключевые слова: оптические диагностики на ИТЭР, лазерная очистка поверхности зеркал, волоконный лазер.

## FIBER LASER CLEANING OF METAL MIRROR SURFACES FOR OPTICAL DIAGNOSTIC SYSTEMS OF THE ITER

A.P. Kuznetsov<sup>1</sup>, A.S. Alexandrova<sup>1</sup>, O.I. Buzhinsky<sup>2</sup>, K.L. Gubskiy<sup>1</sup>, T.V. Kazieva<sup>1</sup>, A.V. Savchenkov<sup>1</sup>, S.N. Tugarinov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia State Research Center of Russian Federation Troitsk Institute for Innovation & Fusion Research, Moscow, Troitsk, Russia

The results of experimental studies on efficiency of metal mirrors cleaning from films of complicated composition using pulsed fiber laser irradiation are presented. It is shown that initial reflectivity of optical elements can be restored by selection of modes of laser interaction with the films sputtered onto the mirror surface. In this case, effective cleaning is provided at power density less than  $10^7$  W/cm<sup>2</sup>. At such a low power density level, cleaning occurs in a solid phase, thus the thermal effect on the mirror is insignificant.

Key words: optical diagnostic on ITER, laser cleaning surface of mirrors, fiber laser.

#### введение

На термоядерном реакторе ИТЭР предполагается использовать комплекс оптических диагностик, измеряющих характеристики плазмы. Оптические элементы диагностических систем, расположенные внутри вакуумной камеры реактора, подвергаются интенсивному радиационному воздействию, распылению атомами перезарядки и загрязнению за счёт переосаждения распылённых материалов первой стенки, лимитеров, диверторных пластин и других элементов. Наиболее уязвимым элементом оптических систем является первое зеркало, рабочая поверхность которого обращена к плазме в камере реактора. Первое зеркало должно удовлетворять ряду требований: иметь высокий коэффициент отражения, высокую теплопроводность, обладать необходимой химической стойкостью, быть устойчивым к трансмутациям, а материал сохранять свои свойства в условиях сильных нейтронных потоков [1-3]. В качестве основных материалов для изготовления первого зеркала в настоящее время в проекте ИТЭР рассматриваются Cu, W, Мо, нержавеющая сталь SS316, Al, Rh, V, Ag, Au, Ni, Cr [4, 5]. Условия эксплуатации и требования к зеркалам в ИТЭР для разных диагностик существенно различаются. В настоящее время в качестве кандидатного материала первого зеркала для ряда оптических диагностик, в частности, активной спектроскопии (Charge Exchange Recombination Spectroscopy — CXRS) и Н<sub>а</sub>-спектроскопии (H Alpha Spectroscopy — HAS) выбран молибден. При проведении имитационных экспериментов по исследованию деградации и модификации поверхности зеркал в условиях, близких к ожидаемым в ИТЭР, могут использоваться образцы, выполненные из нержавеющей стали SS316.

Экспериментальные исследования по экспонированию металлических зеркал, проведённые на токамаках T-10 [6], «Тор Супра», TEXTOR [7], DIII-D [8], JET [9], показали, что наибольшее изменение отражательной способности зеркал вызывают осаждаемые на них плёнки различного состава. Свойства загрязнённой поверхности зеркала зависят от различных условий образования плёнки: температуры, времени взаимодействия, состава продуктов эрозии и газа в плазменной камере, а также от материала зеркала и качества его поверхности. Производить замену зеркал на установке ИТЭР практически невозможно. Поэтому существует необходимость в разработке эффективных бесконтактных и дистанционных методов удаления плёнок, позволяющих очищать поверхности зеркал между рабочими циклами без разгерметизации камеры и демонтажа оптических элементов.

В статье представлены результаты разработки методики и экспериментальных исследований эффективности удаления загрязняющих плёнок сложного состава с поверхности металлических зеркал частотно-периодическим импульсным излучением волоконного лазера. Оптимизация лазерной очистки поверхности зеркал проводилась на образцах, представляющих собой полированные с оптическим качеством подложки из Мо и SS316 с напылением углеводородных и металлических (Wo, Al) плёнок, имитирующих химический состав и условия, близкие к предполагаемым условиям на ИТЭР.

### ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПЕРВЫХ ЗЕРКАЛ И МЕТОДЫ ИХ ОЧИСТКИ

Наиболее существенным по воздействию на первое зеркало является распыление материала стенки реактора, диверторных пластин и других конструкционных элементов установки. В подготовительном режиме работы установки и при кондиционировании зеркала периодически будут подвергаться воздействию ионов гелия и дейтерия при относительно высоком давлении нейтрального газа (10<sup>-3</sup> торр) [10]. При номинальном режиме работы реактора из-за сильного тороидального магнитного поля, уменьшающего подвижность ионов по направлению к поверхности в пристеночной плазме, и за счёт высокого содержания нейтрального водорода в пристеночной плазме основную массу частиц будут составлять нейтралы перезарядки с широким энергетическим спектром [11, 12]. Другими нагружающими факторами являются поток излучения из плазмы (до 0,1 MBт/м<sup>2</sup> [13]) и поток нейтронов, образующихся в ходе термоядерной реакции. В этих условиях на зеркалах образуются плёнки сложного состава. В случае использования углеродосодержащих конструкционных элементов происходит рост углеводородных плёнок. В условиях токамака в зависимости от режима установки, состава, энергии и величины потока частиц на поверхность зеркала и места его размещения состав и свойства С:Н-плёнок могут сильно различаться в диапазоне от полимероподобных, мягких плёнок (отношение  $H/C \sim 1$ ) до твёрдых с H/C = 0, 1— 0,6 [14]. В экспериментах, проводимых на JET [9], наиболее близкой к ИТЭР по использующимся конструкционным материалам внутрикамерных элементов, на экспонированных образцах из поликристаллического молибдена образовались плёнки, в которых основным по содержанию элементом являлся бериллий (материал первой стенки). Относительные массовые доли остальных элементов (по отношению к Be): Ni — 0,1, D — 0,05, W — 0,01, Mo — 0,005, C — 0,001.

Для уменьшения скорости роста плёнок и их удаления были предложены различные методики, но до настоящего времени эффективного решения найдено не было. Образование плёнок может быть замедлено при нагреве зеркал до температуры выше 500 К [15]. Однако на зеркалах из молибдена образуется специфическая плёнка, устойчивая к высоким температурам [16]. Более того, даже небольшое изменение состава плёнки сильно изменяет температуру, при которой замедляется рост плёнок, и не существует универсальной температуры нагрева для всех плёнок. Система продува, создаваемая внутри установки, а также защитные окна и шторки только уменьшают плотность потока частиц, воздействующих на зеркала.

Для очистки зеркал может быть использовано испарение под воздействием плазменного разряда в присутствии различных смесей газов (H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub> и т.д.) [17—19]. Однако состав газа, необходимого для эффективного удаления плёнки, сильно зависит от свойств самой плёнки и должен подбираться индивидуально. В качестве другого варианта очистки может быть использована ионная бомбардировка загрязнённой поверхности, в результате чего происходят химические реакции с участием частиц загрязнённого слоя. При этом необходимо выбирать материал поверхности, более стойкий к распылению, чем осаждённый приповерхностный слой. Основное достоинство этого метода заключается в том, что эффективность очистки практически не зависит от условий образования напылённого слоя и его химического состава. Указанное достоинство может оказаться решающим при проектировании защитных средств в ИТЭР.

Альтернативными плазменным методам удаления плёнок с металлических поверхностей являются лазерные технологии [20]. К преимуществам лазерной очистки относятся дистанционность, возможность доставки излучения лазера в вакуумированные объёмы и внутрь сложных конструкций, отсутствие механического повреждения поверхности, высокая производительность [21]. Все эти качества позволяют рассматривать лазерную очистку как перспективную методику для использования её в условиях ИТЭР для удаления плёнок с поверхности первых зеркал [22—24].

В технологии лазерной обработки материалов в последние несколько лет произошли серьёзные изменения, связанные с внедрением мощных волоконных лазеров [25]. Благодаря лучшему качеству пучка, гибкости в доставке лазерного излучения к обрабатываемому объекту (при необходимости на расстояния до 100 и более метров), большому ресурсу работы (100 000 ч), компактности и меньшей себестоимости изделий они успешно заменяют твёрдотельные и газовые лазеры практически во всех технологических процессах: при резке, сварке, термическом упрочнении. В этой связи представляется целесообразным применить волоконный лазер для очистки оптических элементов на крупномасштабных плазменных установках, в том числе и в ИТЭР. Возможность транспортировки излучения по оптоволокну через технологические каналы в биологической защите реакторов позволяет разработать надёжную систему, способную работать в условиях сильных нейтронных и электромагнитных полей.

### ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ОЧИСТКЕ ПОВЕРХНОСТИ

Лазерная очистка поверхности — многофакторный процесс, определяемый механизмами испарения, абляции, акустическими и ударными воздействиями (рис. 1) [26]. Основную роль при лазерной обработке материалов играют интенсивность и пространственно-временные характеристики излучения, определяющие развитие явлений тепло и массопереноса в веществе. Качество лазерной очистки может также зависеть от состояния самого материала, так как его поглощающая способность сильно зависит от температуры, плотности плазмы, образующейся над поверхностью, и других факторов.

При воздействии лазерного излучения на поверхность металлического зеркала происходит частичное поглощение излучения, вследствие чего металл нагревается, плавится, частично испаряется и ионизируется. Каждую из стадий взаимодействия излучения с веществом можно описать с помощью уравнения теплопроводности со своими граничными условиями. Строгое математическое описание взаимодействия, учитывающее все участвующие физические процессы, является весьма сложным, и в каждом конкретном случае задача решается численными методами [27, 28].

С учётом того, что поглощение излучения происходит в приповерхностном слое металла, а такие параметры, как коэффициент поглощения  $\alpha$ , коэффициент диффузии k и теплопроводности K, постоянны, уравнение теплопроводности можно записать в виде

$$\nabla^2 T(z,t) - \frac{1}{k} \frac{\partial T(z,t)}{\partial t} = -\frac{A(z,t)}{K},$$
(1)

где T(z, t) — температура материала на глубине z через время t; A(z, t) — плотность мощности объёмного источника тепла.

Для квазистационарного режима ( $A = I_0$ ) решение уравнения примет вид

$$T(z,t) = \frac{2\alpha I_0}{K} \sqrt{kt} \, i \, erfc \left(\frac{z}{2\sqrt{kt}}\right); \tag{2}$$

$$T(0,t) = \frac{2\alpha I_0}{K} \sqrt{\frac{kt}{\pi}} .$$
(3)

По температурному полю в материале можно определить критическую плотность потока излучения, необходимую для получения на поверхности материала температуры кипения. В зависимости от плотности мощности излучения, воздействующего на поверхность, лазерная очистка может быть реализована за счёт процессов испарения, ударных процессов либо за счёт акустических и термопластических сил. Оценки показывают, что для большинства материалов эффективная очистка поверхности материалов за счёт испарения (рис. 1, *a*) достигается при плотности мощности  $10^7$ — $10^8$  BT/см<sup>2</sup>. При воздействии импульсного лазерного излучения с плотностью мощностью меньше  $10^7$  BT/см<sup>2</sup> может реализоваться низкопороговый термомеханический механизм ударной абляции плёнки (рис. 1, *б*) [29]. В этом случае в процессы разрушения плёнок включаются термодеформации (упругие, пластические и вязкоупругие), химические реакции (окисления и разложения), миграции дефектов вглубь материалов [30] и т.д.



Рис. 1. Механизмы разрушения загрязняющих плёнок: *а* — термическая десорбция при плавлении поверхности лазерным лучом; *б* — ударная абляция загрязнения

В случае импульсного воздействия лазерного излучения на поверхность ударный механизм основан на разрушении плёнки под действием упругих напряжений. За счёт воздействия на материал лазерных импульсов длительностью <100 нс с частотой 50—100 кГц реализуются быстрое нагревание и охлаждение материала, вследствие чего материал подвергается термопластическому нагружению. Предел прочности хрупких материалов лежит, как правило, ниже предела упругости, а предел прочности материалов на растяжение значительно меньше, чем на сжатие, поэтому, когда лазерное излучение сфокусировано в пятно малого диаметра <100 мкм, появляются трещины, окружающие область облучения, где напряжения максимальны.

Еще один механизм ударной очистки реализуется при образовании ударной волны за счёт возникновения между плёнкой и металлом избыточного давления. Металлическая подложка поглощает воздействующее на неё излучение, и происходит расширение материала или частичное испарение (без образования плазмы). При этом между плёнкой и подложкой возникает избыточ-

ное давление Р, величина которого может быть приближенно описана выражением [31]

$$P = bI^{0,7} \lambda^{-0,3} \tau^{-0,15}, \tag{4}$$

где *I* — плотность мощности излучения, ГВт/см<sup>2</sup>; *b* — коэффициент, зависящий от вещества, на которое воздействует излучение (для С—Н-плёнок  $b \approx 6,5$ );  $\lambda$  — длина волны лазерного излучения, мкм;  $\tau$  — длительность импульса, нс. Если силы, возникающие в результате воздействия излучения на загрязнённую поверхность, превосходят силу адгезии, то происходит удаление загрязнённого слоя. Для плёнок толщиной порядка 100 нм избыточное давление, приводящее к ударной абляции, составляет величину ~4—6 МПа [32, 33]. В таком случае ударный механизм очистки поверхности реализуется при плотностях мощности лазерного излучения порядка 2—4 МВт/см<sup>2</sup>. С учётом того, что толщина и химический состав плёнок варьируются, механизм ударной очистки может реализоваться при плотностях мощности 10<sup>6</sup>—10<sup>7</sup> Вт/см<sup>2</sup>.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ ОЧИСТКИ ОБРАЗЦОВ ЗЕРКАЛ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ И МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ ОПТИЧЕСКОГО КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТЕЙ

Эксперименты проводились с использованием волоконного иттербиевого лазера YLPM-1-4x200-20-20 (IPG Photonics). Длина волны излучения лазера 1064 нм, максимальная энергия в импульсе 1,0 мДж, длительность импульса может варьироваться в диапазоне 4—200 нс, частота следования импульсов 2—

1000 кГц. На выходе транспортного волокна длиной 2 м установлен коллиматор, формирующий пучок апертурой 6 мм и расходимостью 3,7·10<sup>-4</sup> рад. Сканирование лазерного пучка по поверхности образцов осуществлялось двухкоординатным гальванометрическим сканатором Lscan H-10-1064 (ООО «АТЕКО-ТМ»). Для фокусировки лазерного излучения на поверхности мишени был использован объектив SL-1064-500-815 (Ronar -Smith). Объектив просветлён на длину волны 1064 нм и позволяет обрабатывать поверхность площадью до 500×500 мм. Диаметр пятна в фокальной плоскости объектива на расстоянии 900 мм — 50 мкм, что при максимальной пиковой импульсной мощности 15 кВт обеспечивает плотность мощности в зоне обработки до 10<sup>9</sup> Вт/см<sup>2</sup>.

Лазерной очистке были подвергнуты образцы зеркал, изготовленные из молибдена (Мо) и стали (SS316) (рис. 2). На зеркала были нанесены плёнки различного состава. На образцы № 1, 2 (материал SS316, размер 10×10×4 мм) нанесение плёнок проводилось методом магнетронного напыления [34] в условиях рабочей смеси, содержащей 40% аргона, 55% дейтерия и 5% CHD<sub>3</sub> при температуре 120 °C. На образцах осаждались углеродные аморфные полимерные плёнки а-С:Н. Образцы № 3 (Мо, 10×10×4 мм) и № 4 (SS316, 10×10×4 мм) экспонировались в камере токамака Т-10 [35] за 300 импульсов длительностью по 1 с (рабочий газ D<sub>2</sub>, состав газа D/D + C (30-40%)). В качестве основного материала для напыления плёнок на образцы № 5 (материал SS316, размер 15×15×4 мм) и № 6 (материал Мо, размер Ø15×4 мм) был выбран алюминий как наиболее близкий по № 6 — 700 нм)



Рис. 2. Фотографии образцов металлических зеркал с нанесёнными плёнками: № 1, № 2 — образцы из SS316 с углеводородными плёнками, полученными методом магнетронного напыления (толщина плёнок № 1 — 60 нм, № 2 — 500 нм); № 3 (Мо), № 4 (SS316) — в рабочем режиме токамак Т-10 (толщина плёнок № 4 — 110 нм, № 5 — 180 нм); № 5 (SS316), № 6 (Мо) — с плазменным осаждением (толщина плёнок № 5 — 300 нм, № 6 — 700 нм)

физико-химическим свойствам к бериллию. Напыление плёнок проводилось при плазменном осаждении [36] в атмосфере аргона при давлении  $1 \cdot 10^{-3}$  торр, давление остаточных газов  $2 \cdot 10^{-5}$  торр. Ток разряда на алюминиевой мишени 12 мА, напряжение на мишени 900 В. Температура зеркала 150 °C.

Для измерения толщины плёнки и шероховатости поверхности использовался контактный профилометр Dektak 150 (Bruker Corp.). Прибор позволял измерять профиль поверхности в диапазоне до 500 мкм с разрешением 0,1 нм (по высоте) на длине 6 мм. Для характеризации степени шероховатости использован параметр  $R_z$ . Толщина плёнок составила: для образца № 1 — 60 нм, № 2 — 500 нм, № 3 — 110 нм, № 4 — 180 нм, № 5 — 300 нм, № 6 — 700 нм. Средняя величина шероховатости  $R_z$  плёнок для образца № 1 — 25 нм, № 2 — 30 нм, № 3 — 40 нм, № 4 — 90 нм, № 5 — 50 нм, № 6 — 140 нм. Шероховатость чистого металла для разных образцов варьировалась в диапазоне 25—30 нм. На рис. 3 в качестве примера приведён профиль поверхности образца № 6.



Рис. 3. Профиль поверхности образца № 6 с нанесённой плёнкой

Измерения отражательных характеристик образцов до и после очистки проводились с использованием волоконного спектрометра AvaSpec-2048 USB2 (Avantes) в спектральном диапазоне 400—1000 нм. Поверхность образца равномерно освещалась излучением ксеноновой лампы (4200 K). Отражённое излучение собиралось линзой (увеличение оптической системы 2<sup>×</sup>). В плоскости изображения на двухкоординатном сдвигателе размещался торец световода спектрометра (диаметр сердцевины 200 мкм). Перемещение торца световода в плоскости изображения позволяло проводить спектральные измерения излучения, отражённого от различных участков поверхности образцов зеркал, с пространственным разрешением ~200 мкм. Привязка спектральных коэффициентов отражения к абсолютному значению проводилась на длине волны 633 нм с использованием излучения Н—Ne-лазера калориметрическим способом (Ophir Nova II). На рис. 4 представлена спектральная зависимость коэффициента отражения образца № 1 для чистой поверхности и плёнки, нормированная на спектр лампы. Плёнка значительно ухудшает отражение поверхности чистого металла с провалом в зелёной области спектра, что и придаёт образцу с напылением коричневый оттенок.

Очистка зеркал проводилась дорожками шириной 1 мм на всю ширину образцов (с захватом чистой поверхности металла). Лазерный луч перемещался по поверхности образца со скоростью 2 м/с. Расстояние между соседними проходами лазерного луча составляло 30 мкм (рис. 5).



Рис. 4. Спектральная зависимость коэффициента отражения поверхности образца № 1 для чистого металла (*1*) и плёнки (*2*)



Рис. 5. Фотография образца зеркала в процессе лазерной очистки поверхности от плёнки

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 6 представлены фотографии образцов № 1 и № 3 после лазерной чистки. Плотность мощности, с которой проводилась очистка, на различных участках (на фото пронумерованы цифрами 1—6)



Рис. 6. Фотографии образцов № 1 и № 3 после чистки лазерным излучением с различным уровнем плотности мощности на поверхности

приведена в табл. 1, 2. Дорожки 1, 3, 4 (см. табл. 1) очищались за один проход, 5, 6 — за два прохода. Дорожка 2 очищалась минимальной мощностью за 30 проходов. Качество очистки поверхности образцов характеризовалось измерением степени шероховатости и спектрального коэффициента отражения. В табл. 1, 2 приведён коэффициент отражения на длине волны 633 нм.

Таблица1. Коэффициенты отражения и шероховатость поверхности образца № 1 до и после очистки при различном уровне плотности мощности лазерного излучения

N⁰	Плотность мощ- ности, 10 <sup>6</sup> Вт/см <sup>2</sup>	Шероховатость <i>R<sub>z</sub></i> , нм (до/после очистки)	Коэффициент отражения	
			плёнка	металл
			до/после очистки	до/после очистки
1	3	25/15	0,18/0,45	0,60/0,57
2	1,5 (30 пр.)	25/30	0,18/0,46	0,60/0,59
3	4,5	25/10	0,18/0,57	0,60/0,56
4	6	25/20	0,18/0,58	0,60/0,59
5	3 + 1,5	25/15	0,18/0,58	0,60/0,58
6	2,25 + 1,5	25/20	0,18/0,56	0,60/0,60

Таблица2. Коэффициенты отражения и шероховатость поверхности образца № 3 до и после очистки при различном уровне плотности мощности лазерного излучения

r r						
$\mathcal{N}_{2}$	Плотность мощ-	Шероховатость $R_z$ , нм	Коэффициент отражения			
	ности, 10 <sup>6</sup> Вт/см <sup>2</sup>	(до/после очистки)	металл до очистки	плёнка до/после очистки		
1	6	35/35	0,69	0,11/0,7		
2	6 (5 пр.)	35/20	0,69	0,11/0,7		
3	12	35/20	0,69	0,11/0,68		
4	12 (5 пр.)	35/25	0,69	0,11/0,66		
5	18	25/70	0,69	0,11/0,58		
6	18 (2 пр.)	25/90	0,69	0,11/0,64		

Как видно из таблиц, наиболее оптимальные режимы очистки образцов от углеводородных плёнок (коэффициенты отражения после чистки наиболее близки к исходным значениям) соответствуют плотности мощности  $6 \cdot 10^6$  Вт/см<sup>2</sup>. Значительное уменьшение шероховатости на дорожках 1, 3, 5 связано с эффектом лазерной полировки, что свидетельствует о возможности восстанавливать поверхность зеркал, деградирующую в процессе эксплуатации в токамаке.

На рис. 7 представлены спектральные зависимости коэффициента отражения образцов № 1 и № 3, полученные в разных участках поверхности зеркал: на участке с плёнкой, чистая поверхность металла и участок зеркала, очищенный лазерным излучением с плотностью мощности 6·10<sup>6</sup> Вт/см<sup>2</sup>. Видно, что качество поверхности после лазерной очистки практически полностью восстанавливается до исходного состояния. Для всех образцов, покрытых углеводородными плёнками, как при магнетронном напылении, так и в камере токамака Т-10 плотность мощности, обеспечивающая наиболее эффективную очистку поверхности, составляла (4—6)10<sup>6</sup> Вт/см<sup>2</sup>. На изображении поверхности образцов после лазерной



Рис. 7. Спектральные зависимости коэффициента отражения образцов № 1 (*a*) и № 3 (*б*), полученные в разных участках поверхности зеркал: на участке с плёнкой (——), чистая поверхность металла (——), участок зеркала, очищенный лазерным излучением с плотностью мощности 6·10<sup>6</sup> BT/см<sup>2</sup> (——)

очистки, полученном с помощью растрового электронного микроскопа DSM-960 (Opton, Германия) (рис. 8), видно, что удаление происходит именно в твёрдой фазе, а не вследствие испарения плёнки. Некоторые участки плёнки оторвались от поверхности зеркала, в других местах видны микротрещины. На изображении поверхности образца № 3 (рис. 9), полученном с использованием оптического микроскопа, видно, что кромка плёнки носит откольный характер без каких-либо термических повреждений. При плотности мощности более 10<sup>7</sup> Вт/см<sup>2</sup> на поверхности образца № 2 образовались тёмные «пригоревшие» области (рис. 10), возникающие в результате проникновения карбонизированных частиц удаляемой плёнки в подложку при закипании металла. При меньшей плотности мощности (3—5)10<sup>6</sup> Вт/см<sup>2</sup> плёнка отслаивалась от металла в виде пластин и чешуек разного размера.



Рис. 8. Изображения участков поверхности образца № 1, полученные с помощью растрового электронного микроскопа: a =общий вид;  $\delta =$ участок образца, обработанного излучением плотностью мощностью ~3·10<sup>6</sup> Вт/см<sup>2</sup>, недостаточной для полного удаления плёнки



Рис. 9. Изображение поверхности образца № 3: кромка плёнки носит откольный характер без термических повреждений



Рис. 10. Изображение поверхности образца № 2: при плотности мощности более 10<sup>7</sup> Вт/см<sup>2</sup> на поверхности образовались тёмные «пригоревшие» области, возникающие в результате проникновения частиц удаляемой плёнки в подложку при закипании металла

Оценки пороговых мощностей на основе выражения (4) хорошо согласуются с результатами, полученными в ходе очистки образцов № 1—4 от углеродных плёнок. При плотности мощности 3— 6 MBт/см<sup>2</sup> происходило откалывание плёнки в основном за счёт ударной абляции, а при повышении мощности до 10 MBт/см<sup>2</sup> определяющим становился испарительный механизм очистки.

Режимы, отработанные на образцах с углеводородными плёнками, оказались не пригодными для образцов с металлическими плёнками. Плёнки с высоким содержанием металлов, в частности Al, по механическим (упругопластическим) и термодинамическим свойствам близки к материалу подложки, и для их эффективного удаления требуется подбор других режимов лазерной обработки.

Наилучшие результаты были получены в многопроходном режиме сканирования лазерного пучка (10— 50 проходов по одной и той же строке) при существенно меньших плотностях мощности (0,5—2)10<sup>6</sup> Bt/cm<sup>2</sup>.



Рис. 11. Изображения участка поверхности образца № 5 после лазерной очистки 50 проходами излучением с плотностью мощности 1 МВт/см<sup>2</sup> (a,  $\delta$ ), после 10 проходов на поверхности начинают образовываться участки, в которых происходит отслаивание плёнки (s)

Эффективность очистки возрастает при уменьшении длительности импульса (при неизменной энергии в импульсе) и увеличении частоты повторения. На рис. 11, а, б представлены изображения участка поверхности образца № 5 после лазерной очистки, полученные оптическим микроскопом с разным увеличением. Процесс состоял из 50 проходов излучением с плотностью мощности 1 MBт/см<sup>2</sup>, длительностью импульса 50 нс, частота повторения 100 кГц. После 10 проходов на поверхности начинают образовываться участки, в которых происходит отслаивание плёнки (см. рис. 11, в). Дальнейшее воздействие лазерного излучения приводит к увеличению количества отслоившихся участков плёнки и формированию рыхлой структуры в виде «хлопьев» (см. рис. 11, б). Загрязняющая плёнка с поверхности зеркала удалялась полностью без повреждения материала самого зеркала. На рис. 12 представлен профиль поверхности образца № 6. Шероховатость поверхности после лазерной очистки соответствует исходному состоянию образца.



Рис. 12. Профиль поверхности образца № 6

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены экспериментальные исследования возможности и эффективности очистки металлических зеркал от плёнок сложного состава импульсным излучением волоконного лазера. Подбором режимов воздействия излучения на поверхность с напылённой плёнкой удалось восстановить исходные отражательные характеристики оптических элементов. Максимальная эффективность очистки была достигнута при плотности мощности менее 10<sup>7</sup> Вт/см<sup>2</sup>. Удаление загрязнений при такой относительно малой мощности происходит в твёрдой фазе, вследствие чего термическое воздействие на зеркало оказывается незначительным. В оптимальном режиме или близком к нему возможно уменьшение шероховатости поверхности зеркала, что позволит не только очищать зеркала от загрязнений, но и полировать их поверхность.

Предварительные эксперименты по очистке загрязняющих плёнок на поверхности металлических зеркал излучением волоконного лазера показали возможность аппаратной реализации методики, пригодной для её эксплуатации в системах оптических диагностик внутри порт-плагов вакуумной камеры ИТЭР. Авторы выражают благодарность Вуколову К.Ю. и Грашину С.В. за предоставленные для исследований образцы металлических зеркал с напылёнными плёнками.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Litnovsky A., Voitsenya V., Sugie T. et al. Nucl. Fusion, 2009, vol. 49, p. 075014; doi:10.1088/0029-5515/49/7/075014.
- Mukhin E.E., Semenov V.V., Razdobarin A.G. et al. Nucl. Fusion, 2012, vol. 52, p. 013017; doi:10.1088/0029-5515/52/1/013017.
- 3. Voitsenya V., Costley A., Bandourko V. et al. Rev. Sci. Instrum., 2001, vol. 72, № 1, p. 475–482.
- 4. ITER Technical Basis. Plant Description Document. G A0 FDR 1 01-07-13 R1.0, Chapter 2.13, July 2001, p. 20, http://www.iter.org.
- 5. ITER Design Description Document. Diagnostics. (DDD 5.5.C.01), N 55 DDD 5 01-07-23 W 0.3, https://iter.org.
- 6. Vukolov K.Yu., Guseva M.I., Evstigneev S.A. et al. Plasma Devices and Operations, 2004, vol. 12, № 3, p. 193—202.
- 7. Lipa M., Schunke B., Vukolov K. et al. Fus. Eng. and Design, 2006, vol. 81 A, p. 221—225.
- 8. Rudakov D., Yu J.H., Boedo J.A., Hollmann E.M. et al. Rev. Sci. Instr., 2008, vol. 79, № 1, p. 10F303.
- 9. Ivanova D., Rubel M., Widdowson A. et al. An overview of the comprehensive first mirror test in JET with ITER-like wall. Phys. Scr., 2014, vol. T159, p. 014011.
- 10. Мухин Е.Е., Толстяков С.Ю., Кочергин М.М. и др. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2010, вып. 2, с. 59—68.
- Philipps V., Roth J., Loarte A. Key issues in plasma-wall interactions for ITER: European approach. Plasma Physics and Controlled Fusion, 2003, vol. 45, p. 17—30.
- Brooks J.N., Causey R., Federici G. et al. Assessment of erosion and surface tritium inventory issues for the ITER divertor. J. Nucl. Mater., 1997, vol. 241—243, p. 294—298.
- 13. Perkins F.W., Post D.E., Uckan N.A. et al. ITER Physics Basis. Nuclear Fusion, 1999, vol. 39, № 12, p. 2080—2637.
- 14. Вуколов К.Ю., Данелян Л.С., Звонков С.Н. и др. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2006, вып. 4, с. 21—33.
- 15. Gorodetsky A.E., Zalavutdinov R.Kh., Zakharov A.P., Vnukov S.P., Varshavskaya I.G., Makhankov A.N., Mazul I.V., Federici G. J. Nucl. Mater., 2005, vol. 337—339, p. 892.
- 16. Vukolov K., Arkhipov I.I., Mukhammedzyanov T.R., Zvonkov S.N. J. Nucl. Mater., 2009, vol. 390–391, p. 1090.
- 17. Ferreira J., Tabares F., Taffalla D. Ibid., p. 593.
- 18. Schwarz-Selinger T., Genoese F., Hopf C., Jacob W. Ibid., p. 602.
- 19. Arkhipov I., Gorodetsky A., Zalavutdinov R. et al. J. Nucl. Mater., 2010, doi:10.1016/j.jnucmat.2010.09.038.
- 20. **Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И.** Технологические процессы лазерной обработки. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008.
- 21. Вейко В.П., Мутин Т.Ю., Смирнов В.Н., Шахно Е.А. Известия вузов. Приборостроение, 2008, т. 51, № 4, с. 30—36.
- 22. Skinner C.H., Gentile C.A., Doerner R. Fusion Science and Technology, 2013, vol. 64, № 1, p. 1—7.
- 23. Wisse M., Marot L., Eren B. Fusion Engineering and Design, 2013, vol. 88, № 5, p. 388—399.
- 24. Wisse M., Marot L., Widdowson A., Rubel M. Fusion Engineering and Design, 2014, vol. 89, No 2, p. 122–130,
- 25. Gapontsev V.P. In: 12th Intern. Laser Physics Workshop. Hamburg, Germany, Part S.3, 2003.
- 26. Schwarz-Selinger T., Genoese F., Hopf C., Jacob W. J. Nucl. Mater, 2009, № 390—391, p. 602.
- 27. Duley W.W. Laser Processing and Analysis of Materials. New York: Plenum Press, 1983.
- 28. Xiao Q., Lu T., Li Z., Fu L. Laser Phys., doi: 10.1134/S1054660X11170257, 2011.
- 29. Steen W.M., Mazumder J. Laser Material Processing, Springer-Verlag. London, 2010.
- 30. Manshina A., Ivanova T., Povolotskiy A. Laser Phys., 2010, vol. 20, p. 1532.
- 31. Phipps C.R., Turner T.P., Harrison R.F. J. of Applied Physics, 1988, vol. 64 (3), p. 1083.
- 32. Veiko V.P., Shakhno E.A., Smirnov V.N., Miaskovski A.M., Borovskih S.S. Laser Part. Beams, 2006, vol. 24, p. 203.
- 33. Wang Y.G., Ma X.Y. Laser Phys., 2011, vol. 21, p. 148.
- 34. Vukolov K.Yu., Danelyan L.S., Zatekin V.V. et al. J. of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2008, vol. 2, p. 264.
- 35. Свешников Н.Ю., Станкевич В.Г., Архипов И.И. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2012, вып. 3, с. 3—18.
- 36. Begrambekov L.B., Gordeev A.A., Sadovskii Ya.A. J. of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2008, vol. 2, № 3, p. 419—422



Андрей Петрович Кузнецов, доцент, д.ф.-м.н.; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 115409 Москва, Каширское шоссе 31, Россия АРКиznetsov@mephi.ru



Александра Сергеевна Александрова, аспирант; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 115409 Москва, Каширское шоссе 31, Россия



Олег Игоревич Бужинский, начальник лаборатории, д. техн. н.; Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, 142190 Москва, г. Троицк, ул. Пушковых, вл. 12, Россия

Татьяна Вадимовна Казиева, студентка; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 115409 Москва, Каширское шоссе 31, Россия



Константин Леонидович Губский, ассистент, к.ф.-м.н.; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 115409 Москва, Каширское шоссе 31, Россия



Антон Владимирович Савченков, студент; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 115409 Москва, Каширское шоссе 31, Россия





Сергей Николаевич Тугаринов, начальник группы; Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, 142190 Москва, Троицк, ул. Пушковых, вл. 12, Россия

> Статья поступила в редакцию 21 октября 2014 г. Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез, 2014, т. 37, вып. 4, с. 49—59.