

УДК 533.924

ЭФФЕКТ ЭКРАНИРОВКИ ВОЛЬФРАМА ВИСМУТОМ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ МОЩНОГО ПОТОКА ВОДОРОДНОЙ ПЛАЗМЫ

Д.А. Топорков^{1,2}, Д.А. Бурмистров^{1,3}, В.А. Барсук¹, В.В. Гаврилов¹,
С.В. Карелов¹, Н.С. Климов¹, С.Д. Лиджигорьяев^{1,2}, А.В. Пушина^{1,2}

¹ГНЦ РФ «Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований», Москва, Россия

²НИУ Московский физико-технический институт, Москва, Долгопрудный, МО, Россия

³Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

Представлены результаты исследования воздействия мощного потока водородной плазмы, создававшейся импульсным ускорителем 2МК-200, на слой висмута толщиной 7,5 мкм, предварительно вакуумно напылённого на вольфрамовую пластину 30×30×3 мм. При плотности энергии плазменного потока ≈ 600 Дж/см² длительностью ≈ 15 мкс мишень с висмутом благодаря эффекту экранировки адсорбировала ≈ 12 Дж/см². На фронтальной поверхности висмута температура, измеренная спектральным пирометром, не превышала ≈ 1900 К за всё время воздействия водородной плазмы. Приводятся данные спектроскопии излучения приповерхностной плазмы, согласно которым свечение плазмы висмута в спектральном диапазоне $\Delta\lambda \approx 2$ —20 нм локализовано вблизи поверхности на расстоянии ≤ 4 —6 см. Скорость испарения висмута за одно воздействие при указанных параметрах плазменного потока составляла по толщине $\approx 0,5$ мкм.

Ключевые слова: импульсный плазменный ускоритель, висмут, паровая экранировка, спектральный пирометр.

THE EFFECT OF TUNGSTEN SHIELDING WITH BISMUTH UNDER THE INFLUENCE OF POWERFUL FLOW OF HYDROGEN PLASMA

D.A. Toporkov^{1,2}, D.A. Burmistrov^{1,3}, V.A. Barsuk¹, V.V. Gavrilov¹, S.V. Karelov¹, N.S. Klimov¹,
S.D. Lidzhigoriaev^{1,2}, A.V. Pushina^{1,2}

¹State Research Center of Russian Federation Troitsk Institute for Innovation & Fusion Research, Moscow, Troitsk, Russia

²NRU Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow region, Dolgoprudny, Russia

³National Research University MPEI, Moscow, Russia

The study results of an effect of powerful hydrogen plasma flow created by the 2МК-200 pulsed accelerator on a 7.5 microns thick layer of bismuth previously vacuum-sprayed onto a 30 × 30 × 3 mm tungsten plate are presented. At an energy density of the plasma flow at the level of ≈ 600 J/cm² with a duration of ≈ 15 μ s, the target with bismuth, due to the screening effect, absorbed ≈ 12 J/cm². On the frontal surface of bismuth, the temperature measured by a spectral pyrometer did not exceed ≈ 1900 K during the entire exposure to hydrogen plasma. The spectroscopy data of near-surface plasma radiation are presented, according to which the radiation of bismuth plasma in the spectral range $\Delta\lambda \approx 2$ —20 nm is localized near the surface at a distance of ≤ 4 —6 cm. The rate of bismuth evaporation per exposure at the specified plasma flow parameters was ≈ 0.5 microns in thickness.

Key words: pulsed plasma accelerator, bismuth, vapor screening, spectral pyrometer.

DOI: 10.21517/0202-3822-2024-47-2-66-72

ВВЕДЕНИЕ

Импульсные плазменные ускорители, являясь генераторами мощных потоков плазмы, находят широкое применение как в работах по моделированию воздействия плазменно-тепловых нагрузок на различные материалы, в том числе на диверторные вольфрамовые пластины строящегося токамака-реактора ИТЭР [1, 2], так и в разрабатываемом импульсно-периодическом источнике нейтронов для гибридных термоядерных реакторов [3]. В этих проектах по созданию источника энергии на основе управляемого термоядерного синтеза одной из ключевых проблем является устойчивость материалов реакторной камеры при тепловых нагрузках на поверхность до 1 кДж/см² при длительности воздействия ≥ 10 мкс. К настоящему времени именно плазменные ускорители [4, 5] обеспечивают необходимый уровень плазменно-тепловых нагрузок на испытываемые материалы. Среди решаемых при этом задач особо выделяются две: первая — исследование эффекта экранировки собственными парами материала, образующимися на начальной стадии взаимодействия, вторая — разработка численной модели процесса экранировки и её экспериментальная проверка. Поскольку явным лидером в этих опытах среди облучаемых тугоплавких материалов является вольфрам, то и в исследованиях взаимодействия мощных плазменных потоков с материалами к нему проявляется повышенный интерес.

Ранее в серии экспериментов [6] исследовалось образование трещин после воздействия водородного плазменного потока в чистом вольфраме и в вольфраме, покрытом тонким, толщиной несколько микрон, легкоплавким металлом — висмутом. Мотивацией такой постановки эксперимента послужила уверенность, что в ИТЭР формирование напылённого слоя будет происходить в результате осаждения бериллия, испаренного с первой стенки токамака, на поверхность диверторных пластин. Однако объявление висмута бериллиево-подобным металлом является не совсем корректным в силу большого атомного номера висмута ($Z = 83$). К тому же в настоящее время принято решение отказаться от бериллия и использовать вольфрам как в диверторе ИТЭР, так и на первой стенке. При этом необходимо будет иметь защитное покрытие на первой стенке, а возможно, и в диверторе. Перспективным материалом для защитного покрытия в ИТЭР и для существующих и создающихся термоядерных установок можно считать карбид бора B_4C [7], важной отличительной особенностью которого является возможность его нанесения на контактирующую с плазмой поверхность и возобновления в течение разряда токамака. В итоге если вопрос бериллиево-подобности висмута можно считать полностью закрытым, то для выяснения первопричины влияния висмута на снижение образования трещин в вольфраме потребовались дополнительные эксперименты. В данной работе представлены результаты исследования теплового воздействия мощного потока водородной плазмы на вольфрамовую мишень со слоем висмута с привлечением диагностик, контролирующих параметры примешенной плазмы и температуру фронтальной поверхности мишени непосредственно в процессе взаимодействия.

УСТАНОВКА МК-200

В работе представлены результаты исследований, проведённых на установке МК-200 [8]. Водородный плазменный поток с энергосодержанием ≈ 50 кДж, длительностью ≈ 15 мкс и плотностью ионов в потоке на уровне $(2-4)10^{15}$ см^{-3} со скоростью $(4-6)10^7$ $\text{см}\cdot\text{с}^{-1}$ и соответствующей кинетической энергией протонов $0,8-1,8$ кэВ транспортировался в вакуумной камере диаметром 21 см, длиной ≈ 4 м с продольным магнитным полем, нарастающим с 1 Тл на выходе из ускорителя до 2 Тл в мишенной камере. При величине индукции магнитного поля в зоне расположения мишени 2 Тл диаметр плазменного потока составлял ≈ 10 см, что обеспечивало плазменно-тепловую нагрузку на поверхность мишени ≈ 600 Дж/см². Схема эксперимента на установке МК-200 показана на рис. 1.

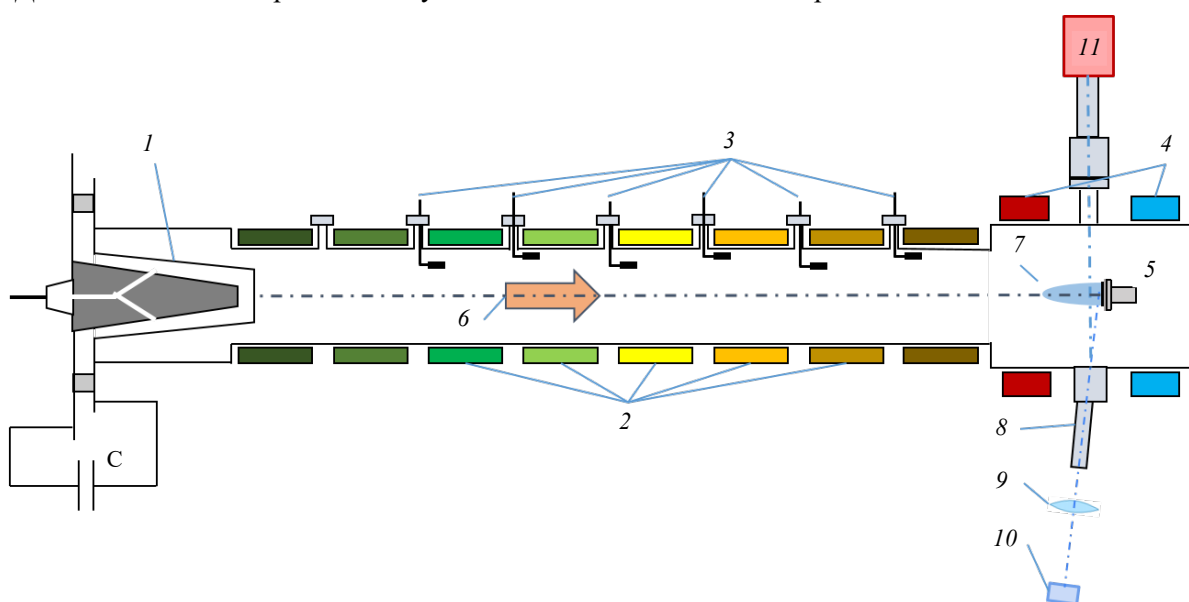


Рис. 1. Схема эксперимента на установке МК-200: 1 — импульсный плазменный ускоритель; 2 — катушки магнитного поля; 3 — магнитные зонды; 4 — катушки Гельмгольца; 5 — мишень; 6 — плазменный поток; 7 — мишенная плазма; 8 — система патрубков; 9 — линза; 10 — пирометр; 11 — спектрометр

В экспериментах использовался вольфрам листовой высокой точности марки В99,95-МП производства АО «Полема». Основой мишени являлась вольфрамовая пластина 30×30 мм толщиной 3 мм, на фронтальную поверхность которой был предварительно напылён висмут толщиной 7,5 мкм. Напыление

проводилось методом резистивного термического испарения висмута в вакуумной установке ВУП-4. Подготовка вольфрама под напыление проходила в ультразвуковой мойке в растворах кальцинированной соды, а затем дистиллированной воды с последующей промывкой этиловым спиртом и обдувкой в струе сухого азота. Это обеспечивало приемлемую адгезию покрытия. Неоднородность напылённого слоя висмута по толщине не превышала 2—3%. Толщина напылённого слоя определялась гравиметрически с использованием аналитических микровесов. На тыльной стороне мишени была закреплена термопара. Термопарный калориметр измерял энергию, поглощённую мишенью в каждом пуске.

В состав диагностического комплекса входили инфракрасный трёхволновой ($\lambda_1 = 850$ нм, $\lambda_2 = 1064$ нм, $\lambda_3 = 1550$ нм, $\Delta\lambda = 10$ нм) пирометр для измерения температуры поверхности мишени с временным разрешением 0,1 мкс [10] и спектрометр ВУФ-МР [11] с пропускающей дифракционной решёткой $d = 200$ нм для регистрации спектров излучения плазмы с пространственным разрешением в диапазоне длин волн 1—25 нм с помощью ПЗС-камеры ALEX-s Greateyes 2k512 BI.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Была проведена серия из двадцати последовательных пусков, в ходе которых контролировалась динамика температуры центральной зоны фронтальной поверхности мишени площадью ≈ 12 мм² и регистрировалось спектрометром ВУФ-МР излучение примешенной плазмы с пространственным разрешением вдоль оси камеры взаимодействия. Ключевые параметры экспериментов — энергозапас ёмкостного накопителя, газовая загрузка импульсного плазменного ускорителя и распределение индукции продольного магнитного поля в камере транспортировки и взаимодействия — поддерживались постоянными на протяжении всех двадцати пусков для обеспечения стабильных плазменно-тепловых нагрузок на мишень.

В течение всей серии пусков свечение плазмы не распространялось далее 4—6 см от поверхности мишени. Типичный вид спектра на первых 15 пусках показан на рис. 2, а и с 16-го по 20-й пуски — на рис. 2, б. Ввиду большого количества спектральных линий висмута и умеренного ($\approx 0,4$ нм) спектрального разрешения спектрографа анализ спектрального состава с целью идентификации линий невозможен. Однако сопоставление спектра, показанного на рис. 2, а, и опубликованных спектров висмута [12] позволяет сделать вывод о наличии свечения ионов висмута Bi^{5+} — Bi^{35+} . Столь широкий диапазон кратностей ионизации в нашем случае объясняется интегральной по времени регистрацией спектров ПЗС-камерой.

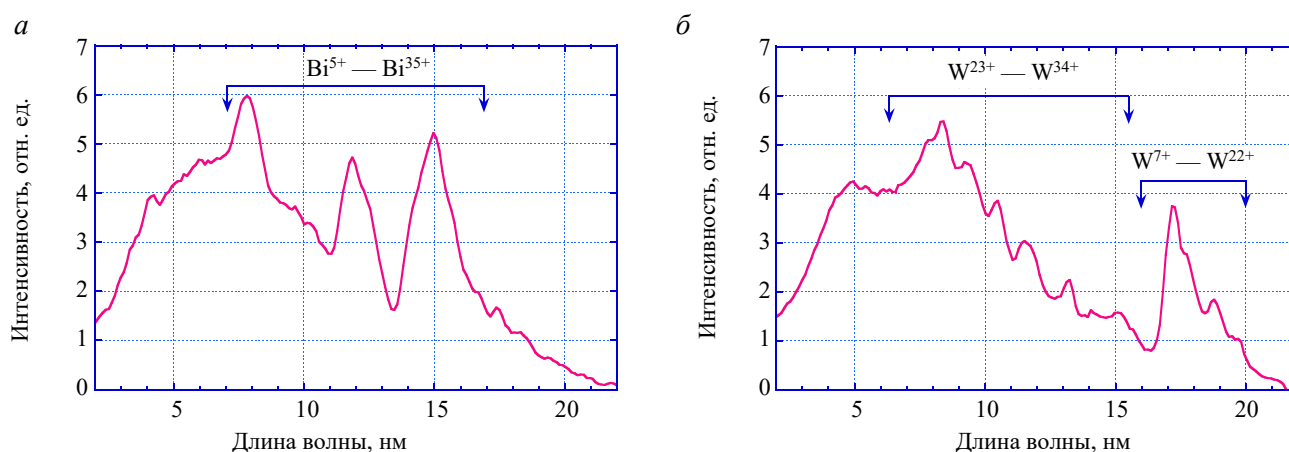


Рис. 2. Типичные спектры излучения мишенной плазмы: а — на первых 15 пусках; б — после 15-го пуска

Начиная с 16-го пуска, регистрировалось излучение со спектром, показанным на рис. 2, б и характерным для ионов вольфрама W^{7+} — W^{34+} [13]. Кардинальное изменение спектра означает, что слой напылённого висмута окончательно испарился в 15-м пуске. Таким образом, в среднем за один пуск испарялось $\approx 0,5$ мкм висмута. Отметим, что на всех зарегистрированных спектрах в коротковолновой области присутствует непрерывное излучение с максимумом вблизи ≈ 5 —6 нм, что согласно [14] соответствует электронной температуре мишенной плазмы на уровне ≈ 100 —120 эВ.

На рис. 3, *a* (2-й пуск) и 3, *б* (15-й пуск) показана динамика измеренной температуры поверхности висмута и соответственно рассчитанной температуры на границе висмут/вольфрам. Точность измерения температуры поверхности мишени пирометром была не хуже ± 50 К. Вычисление проводилось программой, которая по экспериментальным данным пирометра восстанавливала динамику распределения температуры по толщине мишени, включая динамику температуры на границе раздела висмут/вольфрам. Таким образом, решалась обратная задача теплопроводности вглубь мишени с граничным условием на температуру фронтальной поверхности мишени по данным пирометра. Эти вычисления позволили также определить поглощаемую мишенью тепловую энергию для каждого пуска.

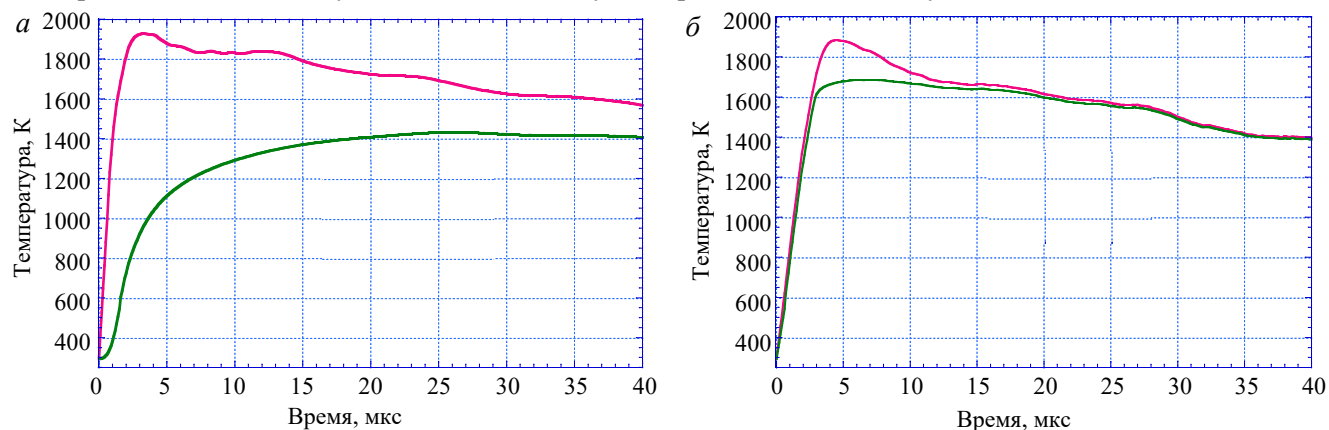


Рис. 3. Измеренные температуры $T(Bi)$ (—) фронтальной поверхности висмута толщиной 7 мкм (2-й пуск) (*a*), 0,5 мкм (15-й пуск) (*б*) и соответствующие им вычисленные температуры $T(W)$ (—) на границе висмут—вольфрам

В то время как максимальная температура фронтальной поверхности мишени достигала только температуры кипения висмута, температура на границе висмут—вольфрам (см. рис. 3, *a*) была далека от температуры плавления вольфрама (3695 К). Аналогичная картина (см. рис. 3, *б*) наблюдалась и в ходе «финального» 15-го пуска, перед которым на мишени, по оценке, оставался слой висмута толщиной $\approx 0,5$ мкм.

С 16-го (рис. 4, *a*) по 20-й (рис. 4, *б*) пуск пирометр фиксировал динамику температуры поверхности мишени с максимальными значениями выше температуры плавления вольфрама. Рост максимальной температуры поверхности после 16-го пуска связан, вероятно, с продолжавшимся снижением влияния паров висмута, ещё остававшегося на поверхности мишени в ходе пусков после 15-го.

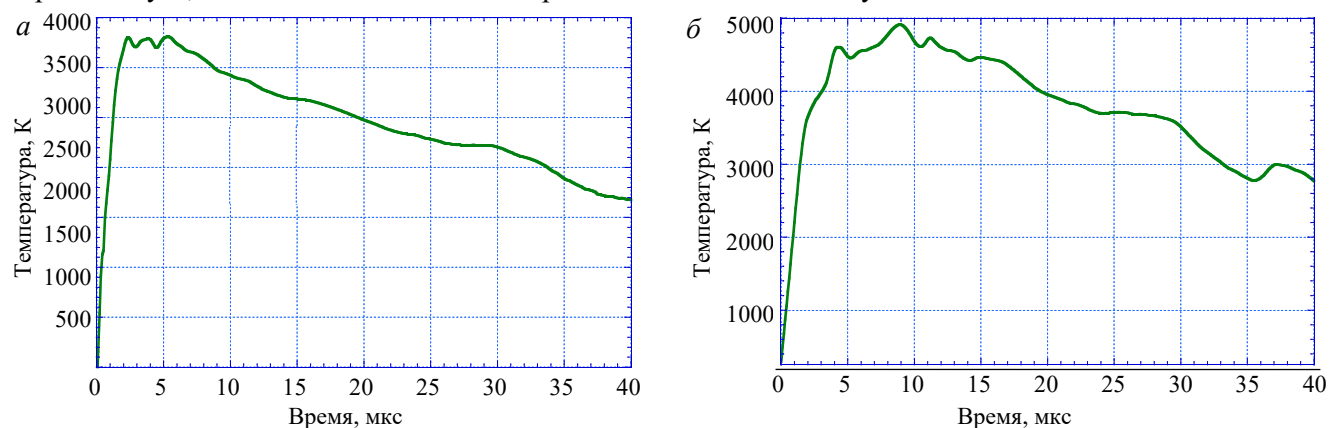


Рис.4. Измеренная температура фронтальной поверхности мишени: *a* — 16-й пуск; *б* — 20-й пуск

Вычисленная для каждого пуска тепловая энергия, поглощённая мишенью (рис. 5), находилась на уровне ≈ 12 Дж/см² при взаимодействии с висмутом (1—15-й пуски) и 25—35 Дж/см² при взаимодействии с вольфрамом (16—20-й пуски). Таким образом, в наших условиях эксперимента эффект экранировки вольфрама слоем висмута толщиной $\geq 0,5$ мкм приводит к значительному снижению поглощаемой мишенью энергии и в итоге к максимально достигаемой вольфрамом температуре, намного

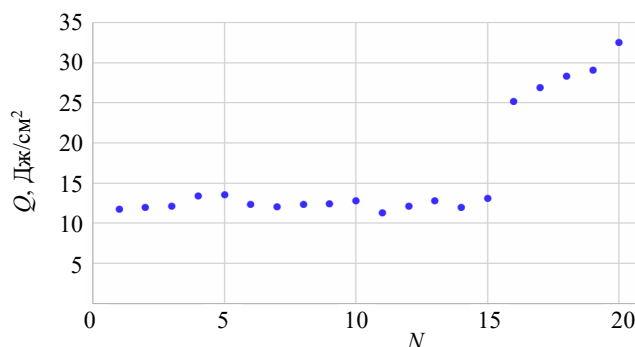


Рис. 5. Энергия, поглощённая вольфрамовой мишенью, в каждом из 20 последовательных пусков

ниже температуры плавления вольфрама. Именно это является первопричиной эффекта защиты висмутом вольфрама от образования трещин при взаимодействии в мощными водородными плазменными потоками. Напомним, что согласно справочным данным вольфрам при температуре 1650 °С имеет самый высокий предел прочности на разрыв.

На рис. 6 показаны фотографии мишени: поверхность висмута на вольфраме перед первым пуском (а) и вольфрама без висмута после 20-го пуска (б). Исследование микроструктуры шлифов сечения вольфрамовой мишени показало, что глубина трещин достигает до 30 мкм, а ширина — до 2 мкм.

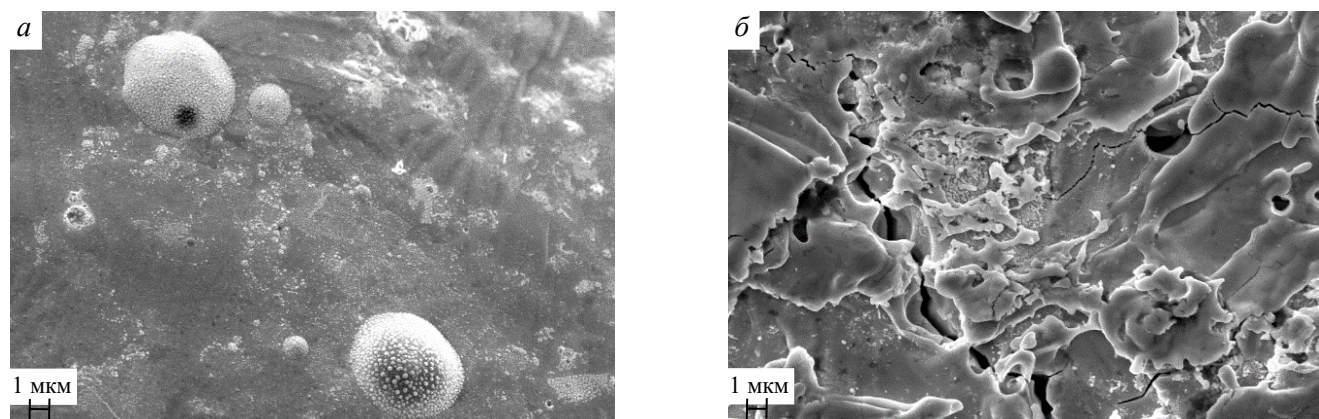


Рис. 6. Поверхность висмута на вольфраме перед первым пуском (а) и вольфрама без висмута после 20-го пуска (б)

Всё многообразие процессов модификации поверхностных слоёв чистого вольфрама под действием плазменно-тепловых нагрузок не являлось предметом данного исследования. Но можно, например, отметить, что следов дугообразования, в том числе множественного, которое является важным каналом передачи энергии от приповерхностной плазмы к вольфраму в токамаках [15], в наших экспериментальных условиях не наблюдалось.

Наличие слоя висмута приводит к значительному снижению максимальной температуры на фронтальной поверхности мишени по сравнению с экспериментами с чистым вольфрамом. Полученные с помощью инфракрасного трёхволнового пирометра данные показали, что максимальная температура поверхности мишени с висмутом за время воздействия достигала 1900 К, незначительно превышая температуру кипения висмута. Поглощённая вольфрамовой мишенью энергия при этом составляла ≈ 12 Дж/см², что почти вдвое меньше, чем в экспериментах по экранировке вольфрама с помощью азотной газовой завесы ≈ 25 Дж/см² [11], и в четыре раза меньше, чем в экспериментах с незащищённым чистым вольфрамом ≈ 50 Дж/см² [16]. Несмотря на более эффективную экранировку вольфрама висмутом по сравнению с азотной газовой завесой, следует учитывать радикальное преимущество газовой завесы как возобновляемой защиты в отличие от безвозвратно испаряющегося слоя висмута. Кроме этого, наличие азотной газовой завесы перед мишенью препятствует распространению паров вольфрама на расстояния более 1 см вдоль силовых линий магнитного поля навстречу налетающему плазменному потоку [11].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате воздействия высокоэнергетичного ≈ 600 Дж/см² потока водородной плазмы длительностью ≈ 15 мкс на вольфрамовую мишень с вакуумно напылённым слоем висмута толщиной $\geq 0,5$ мкм мишень висмут/вольфрам поглощает ≈ 12 Дж/см².

Благодаря низкой температуре кипения висмута происходит интенсивное испарение $\approx 0,5$ мкм за одно воздействие и формирование экранирующего слоя, излучающегося в диапазоне длин волн $\lambda = 2$ —20 нм. Максимальная температура вольфрама, на который нанесён слой висмута, за всё время взаимодействия остаётся почти вдвое меньше температуры плавления вольфрама, что значительно снижает возможные температурные напряжения, являющиеся причиной формирования трещин на вольфраме.

Однако предложение использовать слой висмута в качестве возможной защиты вольфрама бесперспективно по причине невозобновляемости слоя. В то время как наличие возобновляемой азотной газо-

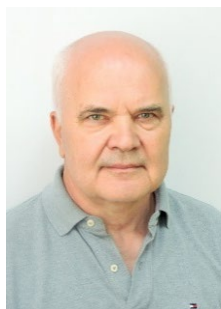
вой завесы не только снижает тепловую нагрузку на вольфрам, но и препятствует распространению паров вольфрама на расстояние более 1 см от поверхности.

Результаты данного исследования получены при проведении работ в рамках Государственного контракта № Н.4к.241.09.22.1074 от 28.04.2022.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Будаев В.П. Результаты испытаний вольфрамовых мишеней дивертора при мощных плазменно-тепловых нагрузках, ожидаемых в ИТЭР и токамаках реакторного масштаба (обзор). — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2015, т. 38, вып. 4, с. 5—33.
2. Pitts R.A., Bonnina X., Escourbiaca F. et al. Physics basis for the first ITER tungsten divertor. — Nuclear Materials and Energy, 2019, vol. 20, p. 100696.
3. Бахтин В.П., Еськов В.Г., Житлухин А.М., Смирнов В.П., Топорков Д.А., Умрихин Н.М., Фортов В.Е., Черковец В.Е. Нейтронные источники для гибридных реакторов на основе сталкивающихся сгустков. — В сб.: АтомТех-2013. Доклады отраслевой научной конференции. НИЯУ МИФИ, 3—4 апреля 2013 г. — М.: МИФИ, 2013, с. 29—36.
4. Позняк И.М., Архипов Н.И., Карелов С.В., Сафронов В.М., Топорков Д.А. Свойства примесей вольфрама, образующихся в плазме при облучении вольфрамовых мишеней мощными плазменными потоками. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2014, т. 37, вып. 1, с. 70—79.
5. Климов Н.С., Коваленко Д.В., Подковыров В.Л., Кочнев Д.М., Ярошевская А.Д., Урлова Р.В., Козлов А.Н., Коновалов В.С. Экспериментальное исследование интегральных характеристик потока плазмы и разряда квазистационарного сильноточного плазменного ускорителя с собственным магнитным полем. — Там же, 2019, т. 42, вып. 3, с. 52—63.
6. Klimov N., Barsuk V., Yaroshevskaya A., Danilina N., Putrik A., Podkovyrov V., Kovalenko D., Zhitlukhin A. Experimental study of the cracks formation on the pure tungsten and the tungsten, which is covered by layer of Be-like materials, under plasma heat loads relevant to ITER transient plasma events. — In: 17th International Conference on Fusion Reactor Materials (ICFRM-17). Aachen, Germany, October 11—16, 2015.
7. Позняк И.М., Алябьев И.А., Подковыров В.Л., Барсук В.А., Цыбенко В.Ю., Бирюлин Е.З., Федулаев Е.Д., Новоселова З.И. Поведение вольфрама с покрытием из карбида бора при воздействии интенсивных плазменных потоков. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2024, т. 47, вып. 1, с. 99—110.
8. Костюшин В.А., Позняк И.М., Топорков Д.А., Бурмистров Д.А., Журавлев К.В., Лиджигорьев С.Д., Усманов Р.Р., Цыбенко В.Ю., Немчинов В.С. Плазменная установка МК-200. — Приборы и техника эксперимента, 2023, № 6, с. 28—34.
9. Житлухин А.М., Илюшин И.В., Сафронов В.М., Скворцов Ю.В. Исследование взаимодействия встречных плазменных потоков в продольном магнитном поле. — Физика плазмы, 1982, т. 8, вып. 3, с. 509—518.
10. Лиджигорьев С.Д., Бурмистров Д.А., Гаврилов В.В., Позняк И.М., Пушина А.В., Топорков Д.А. Исследование теплового воздействия мощных потоков водородной плазмы на поверхность вольфрамовой мишени с помощью инфракрасной пирометрии. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2024, т. 47, вып. 2, с. 67—74.
11. Лиджигорьев С.Д., Бурмистров Д.А., Гаврилов В.В., Костюшин В.А., Позняк И.М., Пушина А.В., Топорков Д.А. Защита вольфрамовой мишени от воздействия мощного потока водородной плазмы с помощью азотной газовой завесы. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2023, т. 46, вып. 2, с. 63—71.
12. Liu L., Sullivan G.O., Reily F.O., Long E., Wang X., Dunne P. EUV spectral analysis of ns-laser produced bismuth plasmas at 8—17 nm. — Optics Express, 1974, vol. 25, № 9, p. 1974—1985.
13. Spectr-W3 Database on Spectroscopic Properties of Atoms and Ions; <http://spectr-w3.snz.ru/splines.phtml>.
14. Диагностика плазмы. Под ред. Р. Хаддлстоуна и С. Леонарда. — М.: Мир, 1967. 299 с.
15. Будаев В.П., Химченко Л.Н., Грашин С.А., Карпов А.В. Эффекты дугообразования при действии плазмы на вольфрамовые компоненты первой стенки в токамаке. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2019, т. 42, вып. 1, с. 51—56.
16. Skovorodin D.I., Pshenov A.A., Arakcheev A.S., Eksaeva E.A., Marenkov E.D., Krashenninnikov S.I. Vapor shielding models and the energy absorbed by divertor targets during transient events. — Physics of Plasmas, 2016, vol. 23, 022501, p. 1—8.

АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», 108840 МОСКВА, ТРОИЦК, УЛ. ПУШКОВЫХ, ВЛ. 12, РОССИЯ



Дмитрий Анатольевич Топорков, с.н.с.; ассистент; МФТИ, 141701 Долгопрудный, МО, Институтский пер. 9, Россия
toporkov@triniti.ru



Даниил Алексеевич Бурмистров, м.н.с.; аспирант; НИУ «МЭИ», 111250 Москва, Красноказарменная ул. 14, стр. 1, Россия
burmistrov@triniti.ru



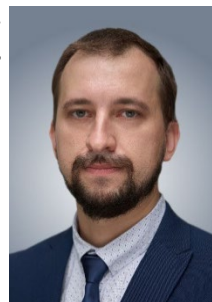
Владимир Андреевич Барсук, ведущий инженер



Валерий Васильевич Гаврилов, в.н.с., д.ф.-м.н.
vvgavril@triniti.ru



Сергей Владимирович Карелов, н.с.
karelov@triniti.ru



Николай Сергеевич Климов, директор по науке и стратегии, директор отделения, к.ф.-м.н.



Санджи Джангарович Лиджигорьяев, м.н.с.; аспирант; МФТИ, 141701 Долгопрудный, МО, Институтский пер. 9, Россия
sandji96@mail.ru



Анита Викторовна Пушина, м.н.с.; студент; МФТИ, 141701 Долгопрудный, МО, Институтский пер. 9, Россия
anitaowl@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 22 декабря 2023 г.
После доработки 16 марта 2024 г.
Принята к публикации 10 апреля 2024 г.
Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Термоядерный синтез, 2024, т. 47, вып. 2, с. 66—72.