

УДК 621.039.634

ПОКРЫТИЯ НА ОБРАЩЁННОЙ К ПЛАЗМЕ ПОВЕРХНОСТИ ПЕРВОЙ СТЕНКИ: АНАЛИЗ И ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ НА СТЕНДЕ «ЦЕФЕЙ-М»

П.Ю. Пискарев¹, Р.В. Рулев¹, И.В. Мазуль¹, А.В. Красильников², А.А. Писарев³, Б.В. Кутеев⁴,
М.С. Колесник¹, В.В. Душик⁵, С.В. Бобров¹, Н.В. Монтанк¹, А.А. Рыбиков¹, Т.Н. Букатин⁵

¹АО «НИИЭФА» им. Д.В. Ефремова, Санкт-Петербург, Россия

²Частное учреждение «Проектный центр ИТЭР», Москва, Россия

³Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

⁴НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

⁵Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, Москва, Россия

Рассмотрены некоторые аспекты использования покрытий разного функционального назначения на обращённой к плазме поверхности первой стенки термоядерного реактора. Важной характеристикой покрытий является адгезионная и усталостная прочность при термоциклическом воздействии квазистационарных нагрузок, а также стойкость к мощным импульсным тепловым нагрузкам. В данной статье описаны термоциклические испытания поверхностной тепловой нагрузкой водоохлаждаемых макетов с различными покрытиями на тепловоспринимающей поверхности. Покрытие В₄С, полученное методом атмосферного плазменного напыления на вольфрамовой подложке, продемонстрировало отличную стойкость по результатам 1400 термоциклов при 4,7 МВт/м². Газофазное вольфрамовое покрытие на медной подложке продемонстрировало хороший результат по итогам 1000 термоциклов при 3,3 МВт/м², но после аналогичного числа циклов при 5 МВт/м² обнаружены трещины на поверхности. Покрытие из нержавеющей стали на медной подложке продемонстрировало стойкость к нагрузкам вплоть до 11,9 МВт/м², а также отличную стойкость по результатам 1000 термоциклов при 8,2 МВт/м².

Ключевые слова: первая стенка, обращённый к плазме материал, карбид бора, вольфрам, стальное антикоррозионное покрытие, атмосферное плазменное напыление, химическое осаждение из паровой фазы, горячее изостатическое прессование, термоциклические испытания.

COATINGS ON A FIRST WALL PLASMA-FACING SURFACE: ANALYSIS AND HIGH HEAT FLUX TESTING ON THE «TSEFEY-M» E-BEAM FACILITY

P.Yu. Piskarev¹, R.V. Rulev¹, I.V. Mazul¹, A.V. Krasilnikov², A.A. Pisarev³, B.V. Kuteev⁴,
M.S. Kolesnik¹, V.V. Dushik⁵, S.V. Bobrov¹, N.V. Montank¹, A.A. Rybikov¹, T.N. Bukatin⁵

¹JSC «NIEFA» (Efremov Institute), Saint-Petersburg, Russia

²Institution «Project Center ITER», Moscow, Russia

³National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

⁴NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

⁵A.N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, Moscow, Russia

Some aspects of the use of coatings for various functional purposes on the first wall plasma-facing surface of a thermonuclear reactor are considered. An important characteristic of coatings is adhesive and fatigue strength under cyclic impact of quasi-stationary heat loads, as well as resistance to high pulsed thermal loads. This paper describes thermal cyclic tests with surface thermal load of water-cooled mock-ups with various coatings on the heat-receiving surface. The B₄C coating, made by atmospheric plasma spraying on a tungsten substrate, demonstrated excellent durability over 1400 thermal cycles at 4.7 MW/m². CVD tungsten coating on a copper substrate demonstrated good results after 1000 thermal cycles at 3.3 MW/m², but after a similar number of cycles at 5 MW/m², cracks were detected on the surface. The SS coating on a copper substrate demonstrated resistance to loads up to 11.9 MW/m², as well as excellent durability over 1000 thermal cycles at 8.2 MW/m².

Key words: first wall, plasma-facing material, boron carbide, tungsten, anti-corrosive SS coating, atmospheric plasma spraying, chemical vapor deposition, hot isostatic pressing, thermal cycling test.

DOI: 10.21517/0202-3822-2024-47-1-111-121

ВВЕДЕНИЕ

Первая стенка термоядерного токамака-реактора, покрывающая большую часть внутреннего объёма разрядной камеры, выполняющая теплозащитные функции и несущая большую тепловую нагрузку, должна иметь длительный ресурс и удовлетворять целому ряду противоречивых требований. Эти требования невозможно одновременно удовлетворить, используя монолитный материал стенки. Например, в проекте токамака ТРТ [1] первая стенка выполнена многослойной и использует бериллий в качестве ма-

териала облицовки, контактирующей с плазмой, жаропрочный медный сплав CuCrZr в качестве материала теплоотводящей подложки с каналами водяного охлаждения, нержавеющей сталь в качестве поддерживающей силовой структуры всей конструкции. Все три слоя надёжно контактируют друг с другом (соединения металлургического типа: пайка, диффузионная сварка, наплавка и др.), обеспечивая надёжный теплоотвод и механическую прочность. Нержавеющая сталь выбрана благодаря высокой прочности, технологичности и опыту использования в высоковакуумных и радиационно-опасных установках. Медные сплавы являются наилучшим материалом для теплоотводящих панелей, подверженных высоким тепловым нагрузкам. Бериллий, обладающий минимальным атомным номером среди кандидатных материалов, при попадании в плазму вызывает минимальные «излучательные» потери тепла, что облегчает нагрев плазмы до термоядерных температур. Технологии получения такой многослойной композиции хорошо проработаны в России в рамках проекта ИТЭР [2, 3]. Ресурс такой первой стенки (после проведённой оптимизации конструкции с целью минимизации термических напряжений) определяется эрозионным ресурсом облицовки, которая под действием плазмы может оплавляться и распыляться, постепенно изнашиваясь/утончаясь. В ТРТ общая продолжительность контакта стенки с плазмой составит не более 100 ч, толщина бериллиевой облицовки порядка 5 мм, которая, по-видимому, сможет прослужить весь срок эксплуатации реактора. В проекте ИТЭР время службы облицовки должно составить не менее 10^3 ч, в реакторных установках ДЕМО и ТИН — ещё на один-два порядка продолжительней. В условиях необходимости обеспечения эффективного теплосъёма и ограничений на толщину облицовки (максимум 6—8 мм), связанных с её перегревом, достижение необходимого ресурса облицовки может потребовать другого подхода.

Такой подход состоит в периодическом или непрерывном возобновлении расходуемого в результате эрозии поверхностного слоя облицовки, осуществляемом дистанционно без разборки реактора и без замены теплоотводящей и опорной частей первой стенки.

Первым вариантом такого возобновления, например, может быть нанесение тонкого (до 30 мкм) покрытия B_4C из газовой фазы при эпизодическом напуске в разрядную камеру газообразного карборана ($C_2B_{10}H_{12}$), который в условиях краевой плазмы токамака разлагается и осаждается на стенку в виде кристаллического карбида бора, элементы которого обладают, как и бериллий, малым атомным номером. Для минимизации разницы в коэффициентах термического расширения карбида бора с материалом подложки и лучшей адгезии покрытия бериллиевую облицовку предлагается заменить на вольфрам. Использование последнего в качестве облицовки первой стенки недавно предложено дирекцией ИТЭР [4], в том числе по причине возможности минимизации эрозии облицовки при её оплавлении при переходных плазменных процессах, что также повышает надёжность всей конструкции. Одним из дополнительных путей повышения адгезионной прочности возобновляемого покрытия может быть использование в качестве подложки предварительно нанесённого «на заводе» на облицовку покрытия (промежуточный слой), близкого по характеристикам к используемому возобновляемому покрытию. Нужно, однако, отметить, что многократное применение процедуры напыления приведёт к росту толстого слоя покрытия в областях, не подверженных эрозии, что несёт в себе опасность отслоения этого слоя и его попадания в плазму.

Второй вариант возобновляемой облицовки связан с использованием тонкого защитного слоя жидкого лития, покрывающего теплоотводящую панель первой стенки [5, 6]. Литий, обладающий самым низким атомным номером среди возможных материалов и, следовательно, минимальным (при сравнении с другими элементами его концентрации в плазме) «загрязнением» плазмы, должен смачивать поверхность первой стенки, защищая её от эрозии и аномальных кратковременных тепловых нагрузок. Для минимизации испарения лития при стационарном воздействии плазмы и её загрязнения температура лития не должна превышать 400—500 °С, что возможно обеспечить только при использовании хорошо охлаждаемой водой (при $T_{вх} = 200$ °С — для обеспечения жидкого состояния лития) подложки из меди или медного сплава. Поскольку медь не совместима с литием [7], предложено использовать тонкое (0,1—0,5 мм) покрытие (фольгу) из нержавеющей стали на медной подложке, что защитит медь от коррозии и не ухудшит теплоотводящую способность подложки. Следует, однако, отметить, что экспериментальный опыт использования жидкометаллических литиевых покрытий имеется пока только для небольших поверхностей порядка 30×30 см и организация такого покрытия, равномерно покрывающего большую поверхность, непростое дело.

Третьим вариантом использования тонкого покрытия в составе многослойной композиции первой стенки термоядерного реактора может быть защитное эрозионно-стойкое вольфрамовое покрытие толщиной 10—100 мкм на бронзовой/медной охлаждаемой подложке, полученное в заводских условиях методом газофазного осаждения (CVD). В этом варианте покрытие не является возобновляемым, но может оказаться оптимальным в следующих двух случаях:

— тонкое вольфрамовое покрытие может обеспечить полный ресурс работы первой стенки в том случае, когда её часть (в некоторых проектах может достигать 60—70% общей площади стенки) находится в тени охранных лимитеров, которые исключают непосредственный контакт первой стенки с плазмой, что радикально снижает скорость эрозии облицовки;

— тонкое газофазное покрытие вольфрамом теплоотводящей панели служит в качестве надёжного высокоплотного технологического подслоя для нанесения более толстого (при необходимости) вольфрамового покрытия, например, методом плазменного напыления (плазменной горелкой), который, возможно, удастся использовать для дистанционного возобновления/ремонта вольфрамовой облицовки внутри разрядной камеры. В последнем случае, вероятно, удастся обеспечить возможность локального селективного восстановления изношенного покрытия, но это требует экспериментальной проверки.

Все три представленных варианта использования тонких покрытий в составе многослойной композиции первой стенки требуют экспериментальной проверки их работоспособности в условиях, характерных для термоядерного реактора. Первоочередным критерием применимости этих покрытий является их стойкость к воздействию мощных тепловых потоков, в том числе в циклическом режиме.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной статье описаны термоциклические испытания поверхностной тепловой нагрузкой трёх макетов с водяным охлаждением и покрытиями различного вида на тепловоспринимающей поверхности.

Для испытаний покрытия W_4C изготовлен макет (рис. 1), включающий выполненное из бронзы CuCrZr основание прямоугольного сечения с круглым каналом охлаждения диаметром 12 мм. На основание припаяны три биметаллические W/Cu-плитки

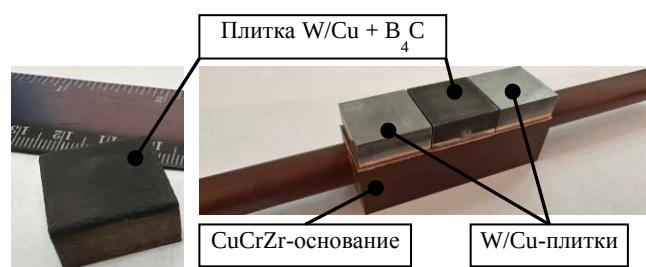


Рис. 1. Макет с покрытием W_4C

размером в плане 24×24 мм, толщиной вольфрама 8 мм, медного подслоя 2 мм. Соединение вольфрама с медью получено методом вакуумной наплавки. На одну из плиток предварительно методом атмосферного плазменного напыления нанесено покрытие W_4C толщиной около 50 мкм [8].

При подготовке плиток к операции пайки, включая мойку в ультразвуковой ванне, часть покрытия (плохо связанные частицы на поверхности) была утрачена. Пайка выполнена в вакуумной печи с резистивными нагревателями. Термический цикл совмещал пайку облицовки и термообработку бронзы CuCrZr: нагрев до 980 °С с выдержкой 30 мин и последующим форсированным охлаждением азотом, а также старение при 480 °С в течение 3 ч. Качество соединений в многослойной композиции W/Cu/CuCrZr после изготовления исследовано методом ультразвукового контроля, который не выявил дефектов.

Для испытания вольфрамового CVD-покрытия изготовлен макет (рис. 2), содержащий биметаллическое Cu/12X18H10T водоохлаждаемое основание, в котором медь, выполняющая функции теплоотводящей матрицы, имеет защитную плакировку из нержавеющей стали со всех сторон, кроме тепловоспринимающей поверхности. Канал охлаждения из нержавеющей трубы Ø10×1 мм также заключён внутри медной матрицы.

Все соединения меди и стали в макете получены диффузионной сваркой методом горячего изостатического прессования (ГИП). На медной тепловоспринимающей поверхности методом га-

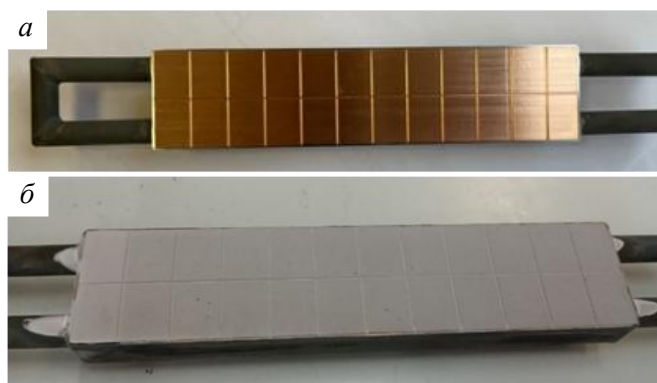


Рис. 2. Макет для испытания CVD-покрытия W: а — до нанесения покрытия; б — после нанесения покрытия

зофазного осаждения вольфрама [9] из смеси гексафторида вольфрама (WF_6) и водорода (H_2) нанесено покрытие W толщиной около 100 мкм. Для снижения влияния поверхностных температурных напряжений из-за градиента температуры во время испытаний на целостность покрытия тепловоспринимающая поверхность макета размером 180×40 мм разделена (до нанесения покрытия) канавками на отдельные участки $14,5 \times 20$ мм. Качество покрытия до испытаний исследовано методом оптической микроскопии. Толщина покрытия измерена на шлифах образца-свидетеля.

Для испытания защитного покрытия из нержавеющей стали на медной водоохлаждаемой матрице изготовлен макет (рис. 3), содержащий медную плиту, покрытую слоем 1—2 мм стали со всех сторон, кроме тепловоспринимающей поверхности, где толщина покрытия составляет 0,2 мм. В плите имеется набор параллельных каналов охлаждения диаметром 10 мм. Размер тепловоспринимающей поверхности в плане составляет 130×200 мм.



Рис. 3. Макет с покрытием из нержавеющей стали: до ГИП (а) и после ГИП и сварки коллекторов (б)

Макет изготовлен с использованием метода диффузионной сварки ГИП, особенности изготовления представлены в статье [10]. В рамках продолжения работ по теме изготовлено несколько макетов аналогичной конструкции, но увеличенного размера (200×300 мм) и разной толщиной покрытия из нержавеющей стали — 0,1—0,3 мм.

УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ТЕПЛОВЫХ ИСПЫТАНИЙ

Тепловые испытания макетов проведены в АО «НИИЭФА» на стенде «Цефей-М» [11]. В качестве источника нагрева поверхности макетов на стенде используется мощная электронно-лучевая пушка (ЭЛП), которая в режиме сканирования с частотой 20 кГц заданной формы раstra нагревает электронным пучком тепловоспринимающую поверхность макета. Для формирования требуемой формы профиля нагрузки и исключения краевых эффектов между ЭЛП и макетом устанавливается маска. Макет и маска имеют независимые контуры водяного охлаждения. На стенде используется набор оборудования термометрической диагностики: тепловизоры, пирометры и термопары. Схема тепловых испытаний на стенде «Цефей-М» показана на рис. 4. Параметры стенда «Цефей-М»:

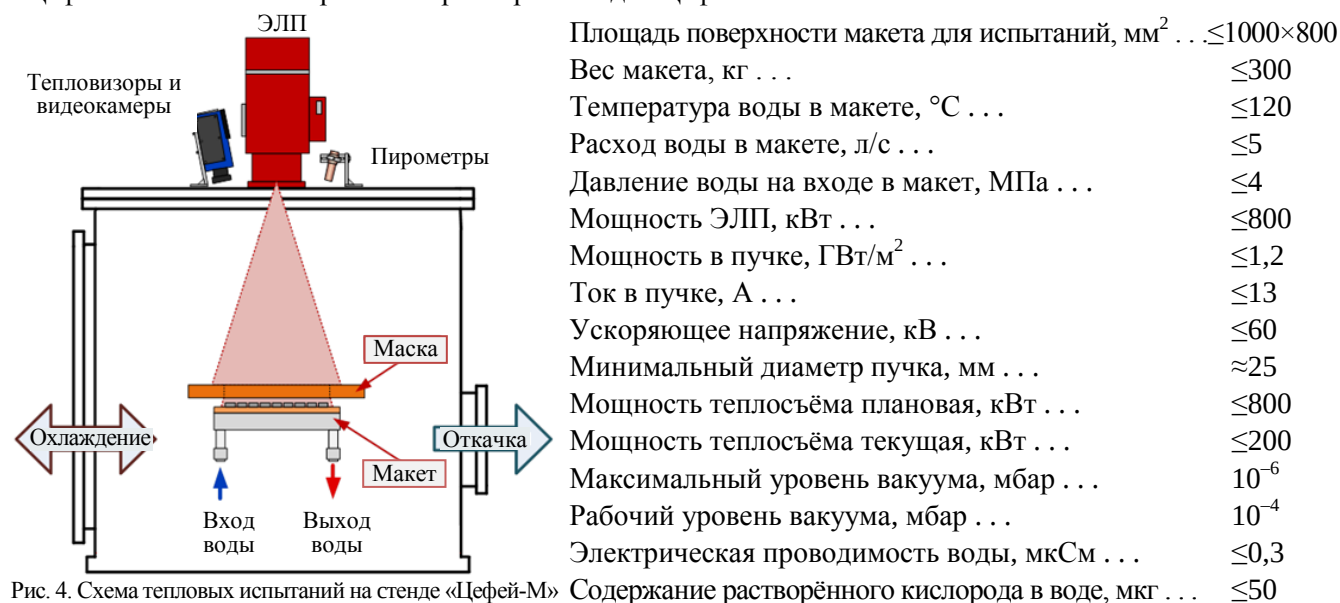


Рис. 4. Схема тепловых испытаний на стенде «Цефей-М»

Все указанные макеты испытаны в режиме циклирования поверхностной тепловой нагрузки. Длительности импульсов и паузы между импульсами выбраны таким образом, чтобы обеспечить необходимое время для достижения стационарного температурного состояния. Для всех макетов длительность импульса составила 15 с и 15 с — пауза.

Макет с покрытием W_4C прошёл термоциклические испытания при постоянном значении плотности поглощённой мощности $4,7 \text{ МВт/м}^2$, что соответствует принятому значению пиковой тепловой нагрузки для энергонапряжённых панелей первой стенки (ППС) ИТЭР. По причине большего коэффициента отражения электронов для W при сканировании пучком электронов расстра, покрывающего все три плитки макета, величина поглощённой мощности на двух крайних плитках без покрытия W_4C будет меньше, чем на средней плитке с покрытием. Для испытаний мощность пучка была определена таким образом, чтобы обеспечить требуемую плотность поглощённой мощности на плитке с покрытием W_4C .

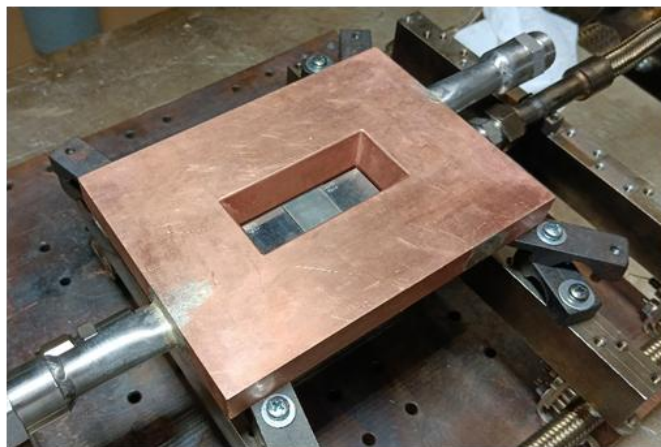


Рис. 5. Макет с покрытием W_4C , установленный на стенде

На рис. 5 показан макет, подготовленный к проведению тепловых испытаний. Размер поверхности, подвергнутой испытаниям, $24 \times 73 \text{ мм}$. Параметры охлаждения макета: входная температура 50°C , давление на входе $3,0 \text{ МПа}$, скорость в канале $\sim 8 \text{ м/с}$.

При испытаниях макета с CVD-покрытием W было выделено две зоны на тепловоспринимающей поверхности, каждая из которых прошла термоциклические испытания при разных значениях плотности поглощённой мощности. Первая зона испытана при $3,3 \text{ МВт/м}^2$, вторая зона — при $5,0 \text{ МВт/м}^2$. Размер поверхности каждой зоны, подвергнутой испытаниям, $40 \times 90 \text{ мм}$. Параметры охлаждения макета: входная температура 115°C , давление на входе $3,0 \text{ МПа}$, скорость в канале $\sim 5 \text{ м/с}$. На рис. 6 показаны фотографии макета, где цветными стрелками обозначены вход и выход охлаждающей воды, а также положение маски для двух зон тепловых испытаний.

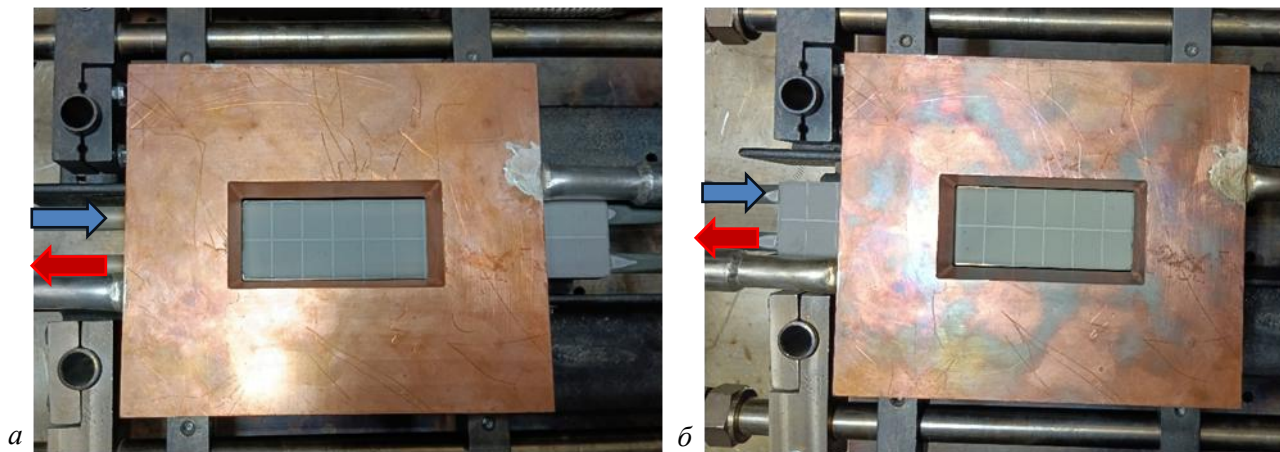


Рис. 6. Зоны тепловых испытаний макета с CVD-покрытием W : а — зона 1; б — зона 2

Макет с защитным покрытием из нержавеющей стали также испытан на двух зонах поверхности при разных режимах. Первая зона испытана в режиме поэтапного с шагом $\sim 0,5 \text{ МВт/м}^2$ повышения плотности поглощённой мощности от $0,5 \text{ МВт/м}^2$ до значения, при котором максимальная температура поверхности достигнет 500°C . На каждом этапе нагружения выполнялось 10 термоциклов. Вторая зона испытана в режиме термоциклирования при постоянном значении плотности поглощённой мощности, определённом на первой зоне. Также проведены дополнительные циклы нагружения первой зоны с поэтапным повышением теплового потока до значения примерно в 1,5 раза больше величины нагрузки, при которой достигнута температура поверхности 500°C . Размер поверхности каждой зоны, подвергнутой испытаниям, $50 \times 87 \text{ мм}$. Параметры охлаждения макета: входная температура 70°C , давление на входе

3,0 МПа, скорость в канале $\sim 4,6$ м/с. На рис. 7 показаны фотография макета и схема расположения двух зон испытаний с указанием направления потока охлаждающей воды.

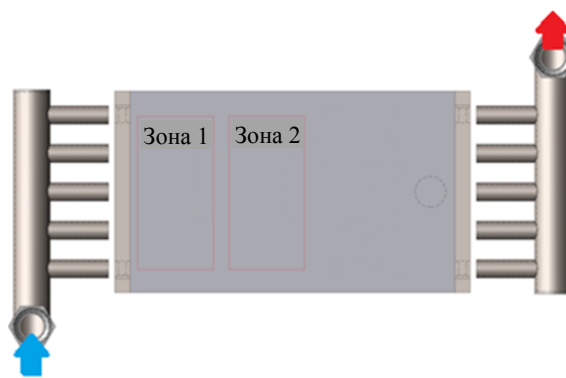
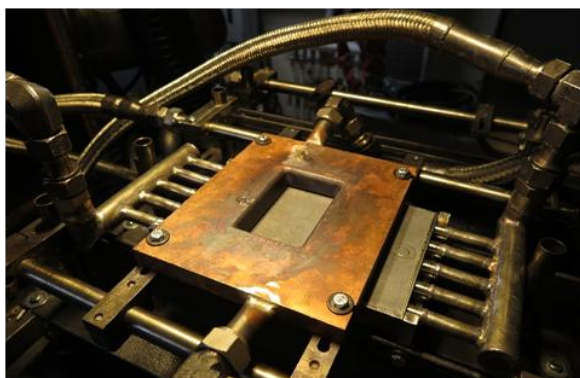


Рис. 7. Зоны тепловых испытаний макета с покрытием из нержавеющей стали

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ МАКЕТА С ПОКРЫТИЕМ W_4C

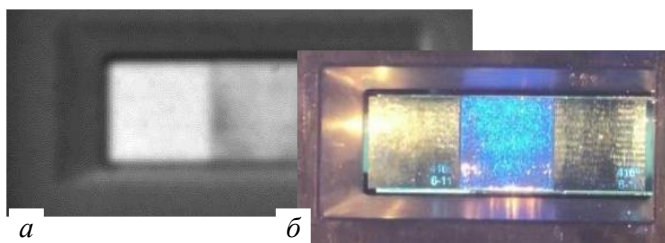


Рис. 8. Эффекты, наблюдаемые во время испытаний макета с W_4C : *a* — изображение с рентгеновской матрицы; *б* — изображение с видеокамеры

излучения, зафиксированная одной из диагностических систем стенда [11], демонстрирует более высокий уровень поглощения электронного пучка на центральной плитке с покрытием. Кроме того, при наблюдении за тепловоспринимающей поверхностью с помощью видеокамеры зафиксировано образование голубоватого свечения поверхности плитки с покрытием. Вероятно, данный визуальный эффект связан с образованием электрического заряда на поверхности из-за полупроводниковых свойств W_4C .

После 1400 термоциклов тепловых испытаний не зафиксировано появления дефектов в виде областей локального перегрева, роста средней температуры поверхности и других, что видно на тепловизионных изображениях поверхности макета на разных стадиях термоциклики (рис. 9). Максимальная температура поверхности плитки с покрытием W_4C достигла ~ 600 °С.

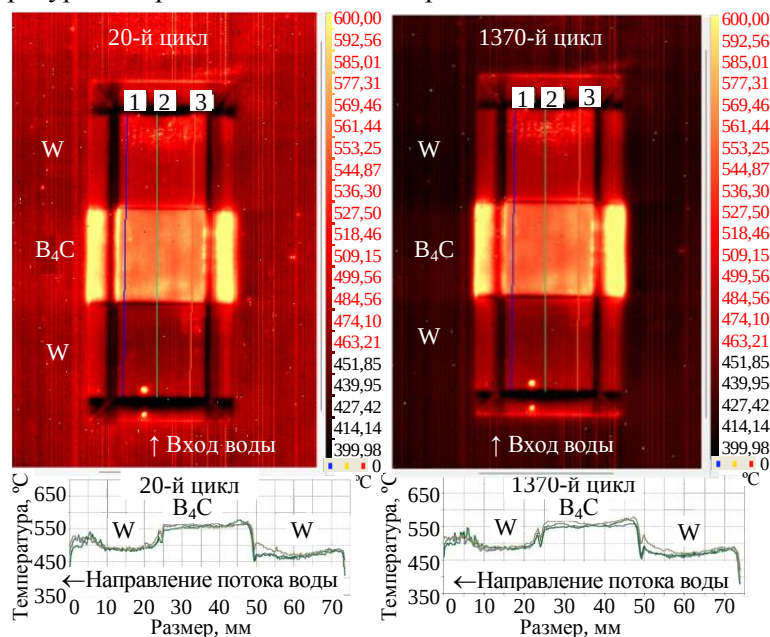


Рис. 9. Тепловизионные изображения поверхности макета: — 1, — 2, — 3

Макет с покрытием W_4C на одной из W/Cu -плиток успешно прошёл 1400 термоциклов тепловых испытаний при плотности поглощённой мощности $4,7$ МВт/м². На рис. 8 показаны некоторые эффекты, наблюдаемые во время испытаний. Поверхность плитки с покрытием нагревалась в среднем на 50 °С выше соседних плиток, что связано с большей величиной поглощённой мощности. Это подтверждается тем, что плотность рентгеновского

излучения, зафиксированная одной из диагностических систем стенда [11], демонстрирует более высокий уровень поглощения электронного пучка на центральной плитке с покрытием. Кроме того, при наблюдении за тепловоспринимающей поверхностью с помощью видеокамеры зафиксировано образование голубоватого свечения поверхности плитки с покрытием. Вероятно, данный визуальный эффект связан с образованием электрического заряда на поверхности из-за полупроводниковых свойств W_4C .

После 1400 термоциклов тепловых испытаний не зафиксировано появления дефектов в виде областей локального перегрева, роста средней температуры поверхности и других, что видно на тепловизионных изображениях поверхности макета на разных стадиях термоциклики (рис. 9). Максимальная температура поверхности плитки с покрытием W_4C достигла ~ 600 °С.

На тепловизионных изображениях стрелкой указано направление потока охлаждающей воды. Видно, что поверхность последней (по направлению потока) плитки оказывается горячее первой, что обусловлено подогревом воды по мере прохождения зоны испытаний. На шкале температуры тепловизионных изображений разный цвет шрифта связан исключительно с текущими параметрами настройки диапазона измерений тепловизора. Также на тепловизионных изображениях нанесены цветные линии, обозначенные цифрами 1, 2, 3. Для каждой линии построены графики изменения температуры в каждой точке вдоль линии, расположенной под соответствующими тепловизионными изображениями.

Визуальный осмотр поверхности плитки с покрытием с использованием оптического микроскопа не выявил трещин, отслоений и прочих дефектов поверхности покрытия (рис. 10).

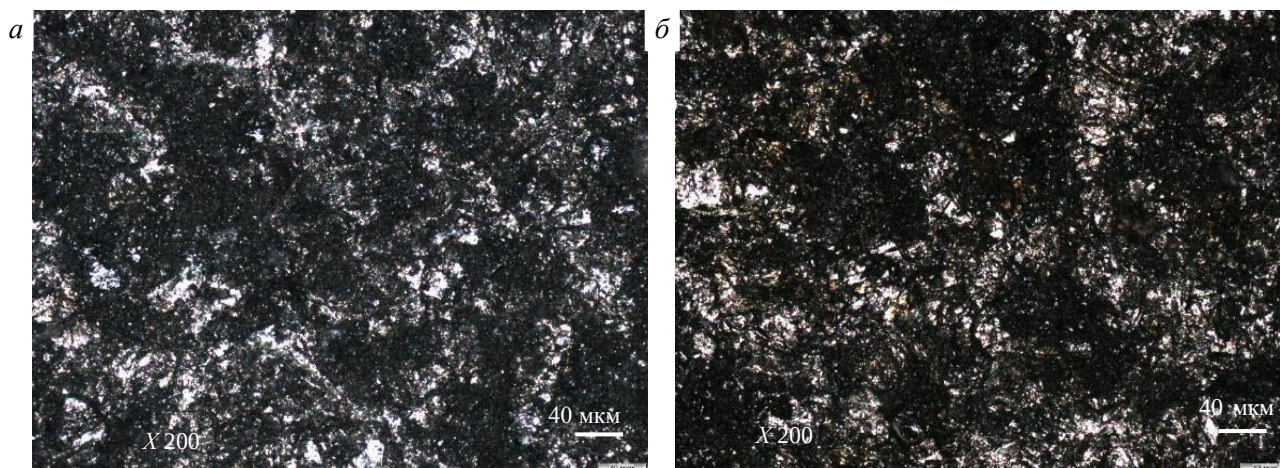


Рис. 10. Снимки поверхности покрытия В₄С до (а) и после (б) термоциклики

Следует отметить, что полученное методом атмосферного плазменного напыления покрытие В₄С имеет развитую поверхность с большим разбросом по высоте профиля поверхности. Результаты измерения профиля поверхности показаны на рис. 11.

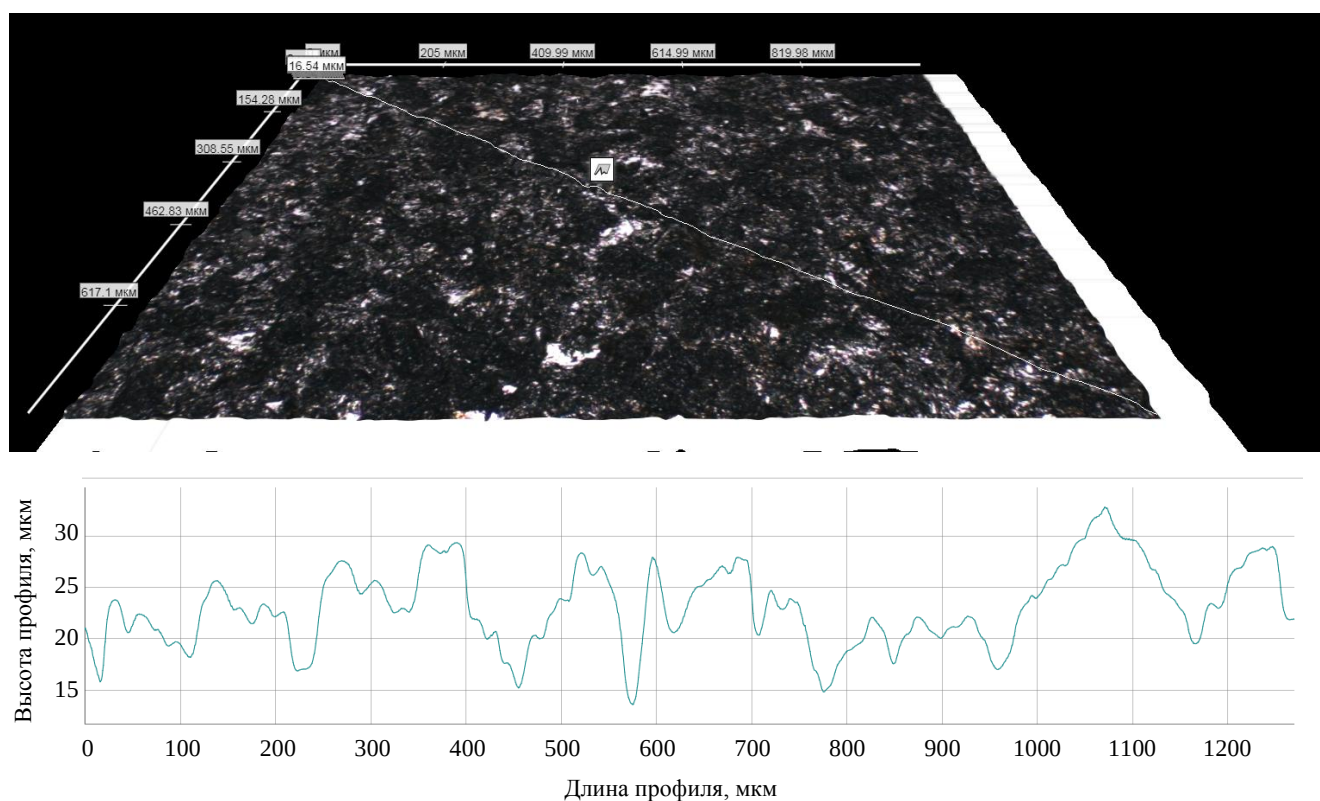


Рис. 11. Профиль поверхности покрытия В₄С после тепловых испытаний

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ МАКЕТА С CVD-ПОКРЫТИЕМ W

Макет с CVD-покрытием W успешно прошёл 1000 термоциклов тепловых испытаний при плотности поглощённой мощности $3,3 \text{ МВт/м}^2$ на первой зоне поверхности. После этого маска была перемещена на вторую половину макета, где макет при тех же параметрах охлаждения успешно прошёл 1000 термоциклов тепловых испытаний при $5,0 \text{ МВт/м}^2$ на второй зоне поверхности.

После термоциклики при двух значениях теплового потока на поверхности не зафиксировано появления дефектов в виде областей локального перегрева, роста средней температуры поверхности и других. Максимальная температура поверхности при $5,0 \text{ МВт/м}^2$ составила около 440°C . При $3,3 \text{ МВт/м}^2$ температура поверхности была ниже диапазона измерений пирометра ($<300^\circ\text{C}$). Некоторые отдельные точки на макете в процессе испытаний светились наиболее ярко, что, скорее всего, свидетельствует о формировании микроскопических капель вольфрама в процессе его нанесения на поверхность, которые не были удалены, так как поверхность не подвергалась дополнительной механической обработке после нанесения. Характерная тепловизионная картина поверхности в момент проведения испытаний, а также график изменения температуры в точках линий 1—6 показаны на рис. 12.

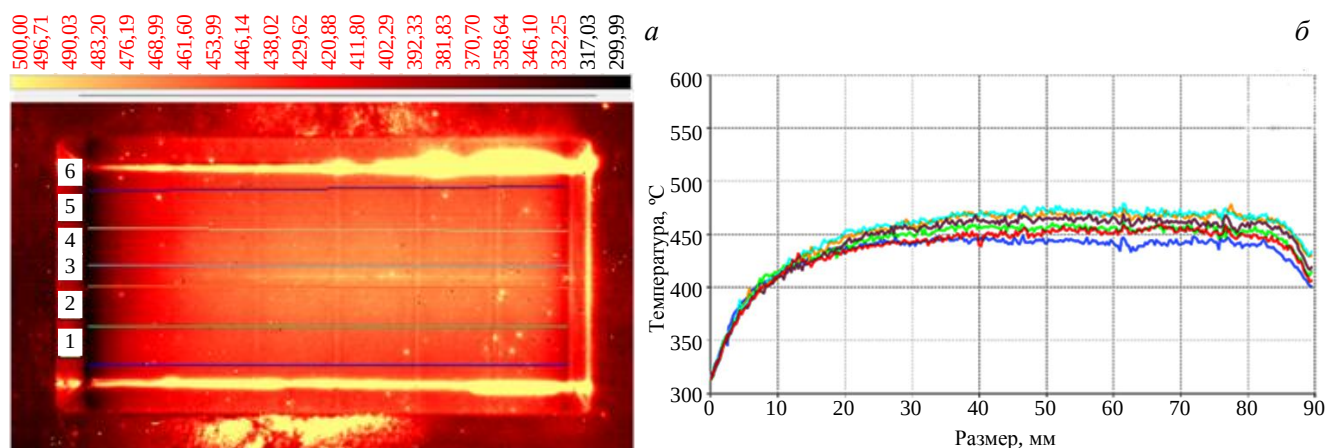


Рис. 12. Тепловизионное изображение макета в процессе испытаний при $3,3 \text{ МВт/м}^2$: — 1; — 2; — 3; — 4; — 5; — 6



Рис. 13. Внешний вид дефекта типа «прижог»

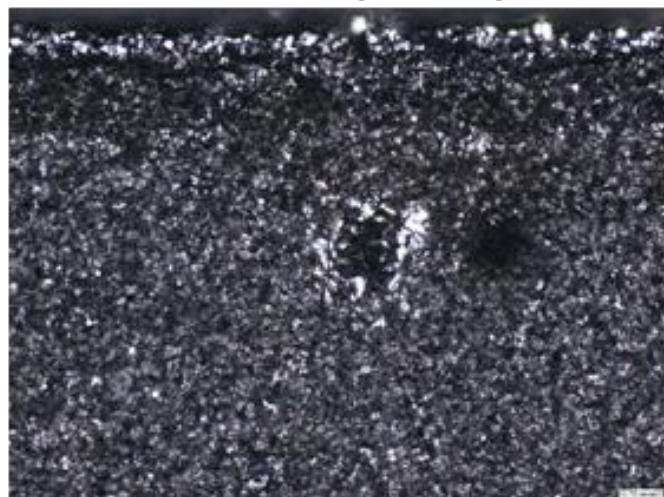


Рис. 14. Внешний вид дефекта типа «кратер»

Визуальный осмотр поверхности макета после испытаний с использованием оптического микроскопа позволил выявить несколько небольших дефектов. На поверхности обеих зон испытаний ($3,3$ и $5,0 \text{ МВт/м}^2$) были обнаружены поверхностные дефекты типа «прижог», вероятно, связанные с выгоранием какого-то загрязнения на поверхности, которое не было удалено при подготовке макета к испытаниям. Устранить данные дефекты возможно при более качественной подготовке макета (шлифовка поверхности, очистка и мойка). Внешний вид данного дефекта показан на рис. 13.

На поверхности, испытанной при $3,3 \text{ МВт/м}^2$, был обнаружен кратер. Вероятно, образованию данного дефекта предшествовало наличие в данном месте капли вольфрама, которая в дальнейшем оторвалась, захватив часть основного покрытия. Устранить данного вида дефекты, вероятно, удастся при проведении шлифовки поверхности после нанесения покрытия. Внешний вид дефекта показан на рис. 14.

На поверхности, испытанной при 5 МВт/м^2 , были обнаружены два участка с трещинами. В обоих случаях трещины располагаются в месте перехода плоского участка поверхности в канавку. Возможно, данные трещины при продолжении термоциклирования могут привести к

локальному отслаиванию покрытия. Внешний вид одной из трещин показан на рис. 15.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ МАКЕТА СО СТАЛЬНЫМ ПОКРЫТИЕМ

Макет с покрытием из нержавеющей стали на первой зоне прошёл тепловые испытания с поэтапным (с шагом $\sim 0,5$ МВт/м²) повышением плотности поглощённой мощности от 0,5 до 8,4 МВт/м², при которой максимальная температура поверхности (по пирометру) достигла 497 °С, что близко к критическому значению 500 °С. В рамках дополнительной программы на первой зоне поверхности макета проведены тепловые испытания с дальнейшим повышением значения плотности поглощённой мощности до 11,9 МВт/м². С учётом термоциклирования по 10 циклов на каждом этапе повышения мощности (кроме первого шага) макет на первой зоне тепловых испытаний выдержал 231 термоцикл. На второй зоне поверхности макет успешно прошёл 1000 термоциклов тепловых испытаний плотности поглощённой мощности при $\sim 8,2$ МВт/м², что немного ниже критического значения, определённого на первом этапе.

Тепловизионные изображения поверхности макета и графики изменения температуры в точках линий 1—5 для разных стадий тепловых испытаний показаны на рис. 16—18. Более горячие яркие области на поверхности макета напрямую связаны с расположением каналов охлаждения в макете и имеют одинаковый характерный вид для разных этапов тепловых испытаний. За исключением данных участков, на поверхности макета не обнаружено областей локального перегрева и прочих дефектов. Максимальная температура поверхности (по пирометру) при 8,2 МВт/м² составляла 487 °С, при 11,9 МВт/м² — 576 °С.

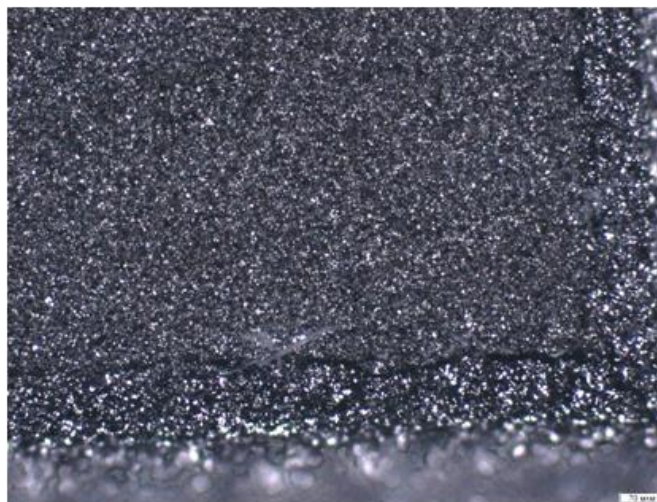


Рис. 15. Внешний вид дефекта трещины

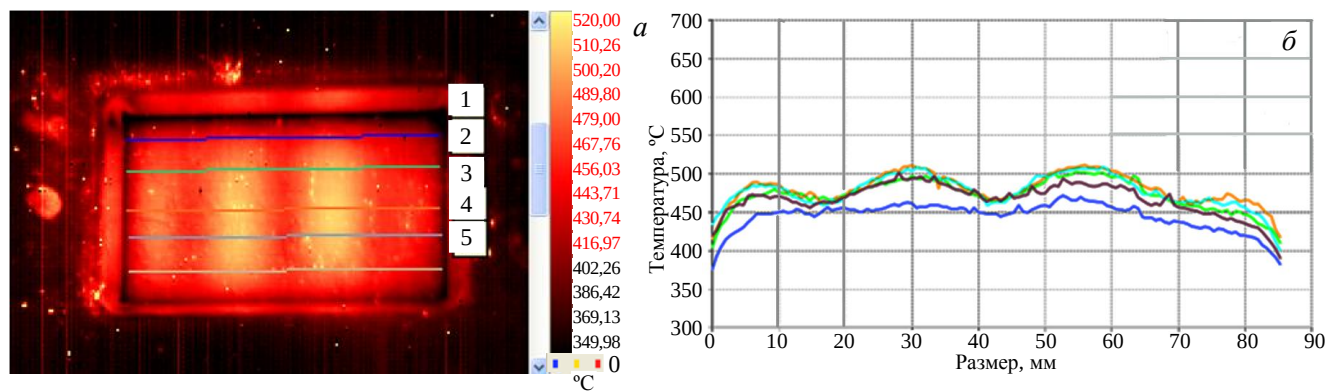


Рис. 16. Тепловизионное изображение поверхности (а) и график распределения температур (б) при 8,4 МВт/м²: — 1; — 2; — 3; — 4; — 5

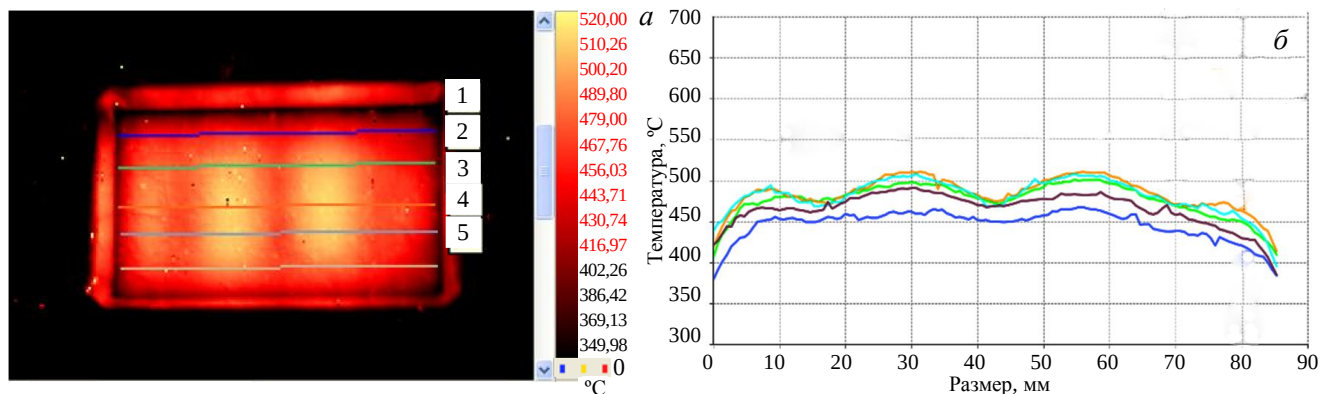


Рис. 17. Тепловизионное изображение поверхности (а) и график распределения температур (б) после 1000 термоциклов при 8,2 МВт/м²: — 1; — 2; — 3; — 4; — 5

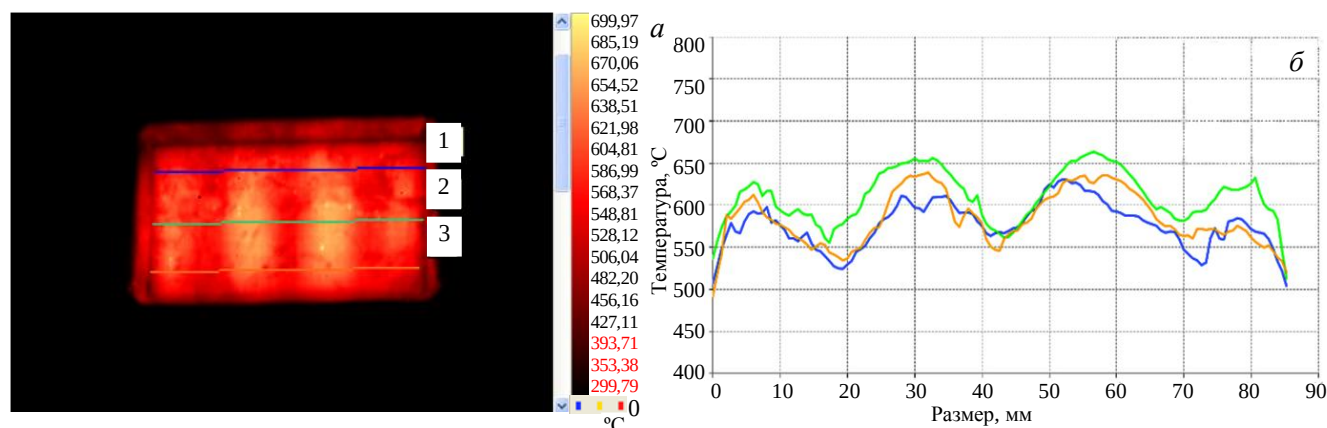


Рис. 18. Тепловизионное изображение поверхности (а) и график распределения температур (б) при 11,9 МВт/м²: — 1; — 2; — 3

После проведённых тепловых испытаний визуальный осмотр поверхности макета не выявил дефектов в виде трещин, расслоений, оплавления поверхности. Покрытие осталось целостным и сохранило свои защитные антикоррозионные функции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённые тепловые испытания водоохлаждаемых макетов с покрытиями различного вида на тепловоспринимающей поверхности позволили выполнить предварительную экспериментальную проверку работоспособности данных покрытий в условиях, характерных для термоядерного реактора.

Покрытие В₄С, полученное методом атмосферного плазменного напыления на поверхности вольфрама, при термоциклировании (1400 циклов) тепловым потоком 4,7 МВт/м², соответствующим значению пиковой тепловой нагрузки высоконагруженных ППС ИТЭР, не испытывает каких-либо повреждений. Дополнительный интерес представляет проведение комбинированных испытаний, совмещающих термоциклирование при стационарной тепловой нагрузке и воздействие периодических мощных короткоимпульсных нагрузок.

Газофазное покрытие W на медной подложке при термоциклировании (1000 циклов) тепловым потоком 3,3 МВт/м² не испытывает каких-либо видимых повреждений. В свою очередь, после термоциклирования (1000 циклов) при 5,0 МВт/м² были обнаружены трещины на поверхности макета в местах перехода плоского участка в канавку. Возможно, при последующем термоциклировании данные трещины могут привести к локальному отслоению покрытия либо трещина пройдёт насквозь до медной подложки, а части покрытия останутся на месте. Стоит отметить, что данное покрытие позиционируется для использования в низконагруженных областях первой стенки, где не предполагаются нагрузки порядка 5,0 МВт/м².

Защитное коррозионно-стойкое покрытие из нержавеющей стали на медной подложке, полученное методом ГИП стальной фольги, показало свою работоспособность в широком диапазоне значений теплового потока. Испытания при поэтапном повышении нагрузки до 11,9 МВт/м², а также термоциклирование (1000 циклов) при 8,2 МВт/м² не привели к каким-либо видимым повреждениям покрытия. Наличие локальных более горячих областей на тепловизионных изображениях поверхности связано исключительно с расположением каналов охлаждения в макете. При последующей разработке реальной конструкции обращённых к плазме элементов, основанных на данной концепции, требуется оптимизировать форму каналов охлаждения.

REFERENCES

1. Piskarev P.Yu., Mazul I.V., Makhankov A.N., Kolesnik M.S., Okuneva E.V., Litunovsky N.V. Plasma-facing components in the TRT project: design, materials and technologies. — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2024, vol. 47, issue 1, p. 41 (in Russian).
2. Gervash A., Giniyatulin R., Guryeva T., Glazunov D., Kuznetsov V., Mazul I., Ogursky A., Piskarev P., Safronov V., Eaton R., Raffray R., Sevryukov O. The development of technology of Be/CuCrZr joining using induction brazing. — Fusion Eng. and Des., 2019, Part B, vol. 146, pp. 2292—2296.
3. Giniyatulin R.N., Mazul I.V., Gervash A.A., Gurieva T.M., Kuznetsov V.E., Makhankov A.N., Okunev A.A., Sevryukov O.N. Overview of manufacturing technologies under development in Russia for ITER plasma facing components. — Ibid., 2018, vol. 136, pp. 527—533.
4. The beryllium armour of the ITER reactor is planned to replace by tungsten one. Press-center NRNU MEPhI, 04.10.2023. URL: <https://www.mephi.ru/press/news/21494> (in Russian).
5. Badger B. et al. Wisconsin Toroidal Fusion Reactor Design Study. UWMAK-1, UWFD-68, 1974.
6. Badger B. et al. Conceptual Tokamak Reactor Design. UWMAK-II, UWFD-112, 1975.

7. **Mikhailov V.N., Evtikhin V.A., Lyublinsky I.E. et al.** Lithium in fusion and space energetics of XXI century. — M.: Energoatomizdat, 1999. 526 p. (in Russian).
8. **Cherepanov D.E., Burdakov A.V., Vyacheslavov L.N., Kazantsev S.R., Kandaurov I.V., Kasatov A.A., Krasilnikov A.V., Popov V.A., Ryzhkov G.A., Shoshin A.A.** Testing of boron carbide coatings under pulsed heat load possible in the divertor zone of the ITER tokamak. — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2024, vol. 47, issue 1, p. 89 (in Russian).
9. **Krasovsky A.I., Chuzhko R.K., Balakhovsky O.A., Tregulov V.R.** Fluoride process of tungsten producing. Physical-chemical basis. Metal properties. — M.: Nauka (Science), 1981. 261 p. (in Russian).
10. **Piskarev P.Yu., Mazul I.V., Zakharov L.E., Tarasyuk G.M., Kolesnik M.S., Rulev R.V., Ogursky A.Yu., Gervash A.A., Ruzanov V.V., Gasparyan Yu.M., Pisarev A.A.** Fabrication and thermal tests of SS/Cu bimetal plate for the use in the concept of flowing liquid lithium layer in tokamak limiters and divertors. — Fusion Eng. and Des., 2022, vol. 184, p. 113313.
11. **Volodin A., Kuznetsov V., Davydov V., Kokoulin A., Komarov A., Mazul I., Mudyugin B., Ovchinnikov I., Stepanov N., Rulev R., Eremkin A., Rogov A., Priyanikov V., Fedosov A.** The high-heat-flux test facilities in the Joint Stock Company «D.V. Efremov Institute of Electrophysical Apparatus». — Ibid., 2015, vol. 98—99, pp. 1411—1414.
12. **Kuznetsov V., Kokoulin A., Komarov A., Malyshev A., Ovchinnikov I., Rulev R., Volodin A., Escourbiac F., Fedosov A., Carpentier-Chouchana S.** X-ray imaging diagnostic in the high heat flux test facilities. — Ibid., 2019, vol. 148, pp. 1—10.

AUTHORS

Piskarev P.Yu. JSC «D.V. Efremov Institute of Electrophysical Apparatus», pos. Metallostroy, Doroga na Metallostroy 3, 196641 St. Petersburg, Russia; piskarev@sintez.niiefa.spb.su

Rulev R.V. JSC «D.V. Efremov Institute of Electrophysical Apparatus», pos. Metallostroy, Doroga na Metallostroy 3, 196641 St. Petersburg, Russia; rulev@sintez.niiefa.spb.su

Mazul I.V. JSC «D.V. Efremov Institute of Electrophysical Apparatus», pos. Metallostroy, Doroga na Metallostroy 3, 196641 St. Petersburg, Russia; mazul@niiefa.spb.su

Krasilnikov A.V. Institution «Project Center ITER», ul. Raspletina 11, korpus 2, 123060 Moscow, Russia; A.Krasilnikov@iterf.ru

Pisarev A.A. National Research Nuclear University MEPhI, Kashirskoye shosse 31, 115409 Moscow, Russia

Kuteev B.V. NRC «Kurchatov Institute», pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Kuteev_BV@nrcki.ru

Kolesnik M.S. JSC «D.V. Efremov Institute of Electrophysical Apparatus», pos. Metallostroy, Doroga na Metallostroy 3, 196641 St. Petersburg, Russia; kolesnik@sintez.niiefa.spb.su

Dushik V.V. A.N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry RAS, Leninsky prospect 31, 119071 Moscow, Russia; v.dushik@gmail.com

Bobrov S.V. JSC «D.V. Efremov Institute of Electrophysical Apparatus», pos. Metallostroy, Doroga na Metallostroy 3, 196641 St. Petersburg, Russia; bobrov@sintez.niiefa.spb.su

Montak N.V. JSC «D.V. Efremov Institute of Electrophysical Apparatus», pos. Metallostroy, Doroga na Metallostroy 3, 196641 St. Petersburg, Russia;

Rybikov A.A. JSC «D.V. Efremov Institute of Electrophysical Apparatus», pos. Metallostroy, Doroga na Metallostroy 3, 196641 St. Petersburg, Russia; rybikov@sintez.niiefa.spb.su

Bukatin T.N. A.N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry RAS, Leninsky prospect 31, 119071 Moscow, Russia; bukatin.t@gmail.com

Received 24 October 2023

Revised 10 January 2024

Accepted 17 January 2024

Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2024, vol. 47, issue 1, pp. 111—121