## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ (Cr-Ag)-ПОКРЫТИЙ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ЭКРАНОВ

## Ш. Хуан, В. Лю, Ш. С. Ду\*, Ц. Ш. Чэнь, С. Х. Чэнь

Аньхойский университет Цзяньчжу, Хэфэй, Китай

\*Институт физики плазмы Академии наук Китая, Хэфэй, Китай E-mails: hs18556919674@163.com, weiliu8202@163.com, ssdu@ipp.ac.cn, chcs1975@163.com, chenxuehui@ahjzu.edu.cn

Исследованы микроструктура, качество поверхности и свойства покрытий теплозащитных экранов, полученных с использованием метода магнетронного напыления и метода гальванического покрытия. Установлено, что (Cr–Ag)-покрытие, полученное методом магнетронного напыления, более гладкое, его пористость и коэффициент излучения меньше, а твердость больше, чем у покрытия, полученного методом гальванического покрытия.

Ключевые слова: теплозащитный экран, магнетронное напыление, гальваника, (Cr-Ag)-покрытие, численное моделирование

Введение. Международный термоядерный экспериментальный реактор должен стать новым экологически чистым источником энергии [1]. Теплозащитный экран, являющийся одним из важнейших компонентов боковой калибровочной коробки реактора, расположен между сверхпроводящим магнитом и сосудом Дьюара. Основная функция теплозащитного экрана заключается в уменьшении теплового излучения, передаваемого сверхпроводящему магниту [2, 3]. При комнатной температуре сосуд Дьюара излучает большое количество тепла на поверхность теплозащитного экрана. Для улучшения теплоизоляционных характеристик экрана используются различные покрытия. В частности, покрытие, содержащее серебро, имеет небольшой коэффициент излучения и высокую адгезию.

В работе [4] исследованы трибологические свойства покрытия из углеродных нанотрубок, облицованных серебром и необлицованных. Установлено, что скорость изнашивания покрытия из углеродных нанотрубок, полученного методом химического осаждения, приблизительно в 10 раз меньше скорости изнашивания покрытия из необлицованных углеродных нанотрубок при внешней нагрузке 10 мН и толщине слоя Ag, равной 65 нм. В работе [5] исследованы высокотемпературные фрикционные и износостойкие свойства нанокомпозитного покрытия Ni–P–Ag–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, полученного методом химического осаждения. Из результатов исследования следует, что самосмазывающееся серебряное покрытие оказывает существенное влияние на коэффициент трения и износостойкость композиционного покрытия. В [6] методом распыления получено серебряно-графитовое покрытие

Работа выполнена при финансовой поддержке Национального фонда естественных наук Китая (грант № 51875152), Фонда выдающихся молодых талантов колледжа провинции Аньхой (грант № gxyq2020034) и Фонда естественных наук Аньхойского университета Цзяньчжу (грант № 2019QDZ20).

<sup>©</sup> Хуан Ш., Лю В., Ду Ш. С., Чэнь Ц. Ш., Чэнь С. Х., 2023

поверхности нержавеющей стали SS-316L и установлено, что это покрытие имеет высокие электропроводность и коррозионную стойкость. В работе [7] с использованием метода электроосаждения получено поликристаллическое серебряное покрытие и исследованы его шероховатость и коррозионные свойства. Показано, что при увеличении шероховатости поверхности на 20 нм ее коррозионная стойкость уменьшается в два раза, при этом существенно снижается устойчивость к агрессивным средам.

В ряде работ проведено исследование влияния двух методов получения серебряного покрытия (метода магнетронного напыления (МН) и метода гальванического покрытия (ГП)) на пористость, твердость и тепловое излучение. Однако низкая адгезионная прочность приводит к быстрому разрушению покрытия, что является одним из основных недостатков, ограничивающих применение серебряного покрытия. Следует отметить, что добавление хрома может улучшить адгезионные свойства покрытия.

В данной работе приводятся результаты экспериментального исследования и численного моделирования пористости, твердости и излучательной способности (Cr–Ag)-покрытий, полученных методами МН и ГП.

1. Материалы и методы, используемые в эксперименте. Ниже приводится описание используемых материалов и экспериментального оборудования.

1.1. Материалы, используемые в эксперименте. В качестве материала матрицы использовался алюминиевый сплав 6061, применяемый при изготовлении теплозащитных экранов. Для получения зеркальной поверхности с требуемой отражательной способностью диски из алюминиевого сплава 6061 диаметром 28 мм и толщиной 5 мм обрабатывались методом проволочной резки. Перед нанесением покрытия поверхность дисков полировалась наждачной бумагой 400#, 800#, 1200# и 1500#. Затем образцы очищались ультразвуком в течение 20 мин, после чего помещались в печь вакуумного отжига (WZH-45) для снятия внутренних остаточных напряжений.

Покрытие Cr–Ag наносилось методом плазменного MH на установке VTC-16-SM (Hefei Kejing Material Technology Co., LTD). На рис. 1 показана схема установки, а в таблице приведены параметры процесса MH (P — давление, V — напряжение смещения, I — сила тока). В процессе ГП температура покрытия составляла 20 °C, плотность электрического тока — 2 A/дм<sup>2</sup>, длительность процесса покрытия — 20 мин. Толщина покрытий Cr–Ag, полученных методами MH и ГП, составляла 8 и 3 мкм соответственно.

1.2. Описание экспериментов. Микротвердость покрытия по Виккерсу измерялась на микротвердомере Wilson 401MVD (к поверхности покрытия прикладывалось усилие, равное 1460 мH, время нагружения составляло 10 с). В качестве значения твердости для каждого образца принималось среднее по пяти измерениям значение. Для исследования пористости и микроскопической морфологии использовались оптический микроскоп Аxiovert 40 MAT и сканирующий электронный микроскоп Zeiss EVO180. Излучательная способность поверхности измерялась двухдиапазонным измерителем коэффициента излучения IR-2, разработанным Академией наук Китая. Диапазон волн измерителя составляет 1 ÷ 22 мкм. Образцы помещались в жидкий азот, температура которого равна 80 K, что близко к рабочей температуре теплозащитных экранов.

**2.** Результаты исследования и их обсуждение. Ниже приводятся результаты экспериментального исследования свойств поверхностей теплозащитных экранов с (Cr–Ag)покрытиями, полученными методами МН и ГП.

2.1. Микроструктура. На рис. 2 показаны фотографии поверхностей (Cr–Ag)-покрытий, полученных методами МН и ГП. После МН поверхность имеет тонкую компактную зернистую структуру (см. рис. 2,a), после ГП — волнистую структуру (см. рис. 2,b). Следовательно, распределение частиц в покрытии, полученном методом МН, более плотное и равномерное, чем в покрытии, полученном методом ГП. Основной причиной различия



Рис. 1. Схема установки для нанесения покрытия методом МН: 1 — устройство для передачи тока, 2 — двигатель, 3 — распылитель, 4 — обрабатываемая деталь, 5 — компьютер, 6 — трубка, 7 — насос, 8 — сосуд для аргона, 9 верстак, 10 — аргон

Параметры процесса среднечастотного магнетронного напыления (	Cr–Ag)-покрытия
с использованием постоянного тока	

Тип обработки	P, Па	V, B	I, A	Окружающая среда
Плазменное травление	0,5	100	50	Ar
Плазменное травление и дуговая сварка	0,5	100 (травление), 100 (сварка)	50	Ar
Среднечастотное МН	0,5	220	10	Ar
МН с использованием постоянного тока	0,5	220	10	Ar



Рис. 2. Морфология поверхности: *a* — поверхность после МН, *б* — поверхность после ГП





 $1 - {\rm Ag}(111), \, 2 - {\rm Ag}(200), \, 3 - {\rm Ag}(220), \, 4 - {\rm Ag}(311), \, 5 - {\rm Ag}(222)$ 

качества поверхностей, полученных с использованием двух методов, является наличие вакуума при MH. В вакуумной среде на электроны, движущиеся в магнитном поле, действует сила Лоренца, вследствие чего траектории электронов имеют изогнутую и даже спиральную форму, а длина пути электронов увеличивается. В результате увеличения количества столкновений молекул газа существенно увеличиваются плотность плазмы и скорость MH. Следовательно, степень загрязнения поверхности уменьшается, а энергия атомов серебра, падающих на матрицу, увеличивается [8]. На поверхности (Cr–Ag)-покрытия образуется плотный однородный зернистый слой серебра, что улучшает качество покрытия. При использовании метода ГП качество покрытия зависит от качества гальванического раствора, температуры покрытия и плотности тока. Кроме того, распределение большого количества ионов на поверхности матрицы влияет на процесс нанесения покрытия, что способствует увеличению размера частиц на его поверхности и их неравномерному распределению.

На рис. 3 представлены результаты фазового анализа (Cr-Ag)-покрытий, полученных с использованием методов МН и ГП. Следует отметить, что для двух групп экспериментальных образцов на дифракционных рентгенограммах имеется пять отчетливо выраженных пиков, соответствующих фазе серебра, и отсутствуют пики, соответствующие другим гетерогенным фазам. Основной ориентацией кристаллической структуры покрытия из серебра, полученного двумя методами, является ориентация (111), а также ориентации (311), (222) и (220), характерные для гранецентрированной кубической кристаллической структуры. Таким образом, ни МН, ни ГП не могут изменить основную ориентацию серебряной фазы [9]. В отличие от покрытия, полученного методом ГП, для покрытия серебром, нанесенного методом МН, каждый дифракционный пик смещен в направлении большего значения угла 2 $\theta$ . Наибольший дифракционный пик появляется при  $2\theta = 38,5^{\circ}$ , что соответствует семейству кристаллических плоскостей (111). Кристаллическая плоскость является одновременно плоскостью скольжения и плоскостью двойникования. Кристаллы-близнецы обычно укладываются друг на друга, образуя зеркальную поверхность. Семейство кристаллических плоскостей (111) оказывает положительное влияние на механические свойства покрытия (твердость, износостойкость, пластичность). Дифракционные пики (Cr-Ag)-покрытия, полученного методом MH, более острые, в то время как дифракционные пики (Cr-Ag)-покрытия, нанесенного методом  $\Gamma\Pi$ , более широкие,



Рис. 4. Пористость покрытий, полученных методами МН (a) <br/>и $\Gamma\Pi$ (б):  $\Pi$ — поры на поверхности покрытия



Рис. 5. Диаграммы твердости HV различных поверхностей: 1 — матрица из алюминиевого сплава, 2 — (Cr-Ag)-покрытие, полученное методом MH,

3 — (Сг–А<br/>g)-покрытие, полученное методом ГП

размытые. Покрытие, полученное методом MH, имеет более высокую кристалличность. Дислокационные дефекты и беспорядочное расположение атомов на границах зерен в кристаллическом покрытии, полученном методом ГП, имеют слабую регулярность. Кроме того, бо́льшая доля серебряной фазы в покрытии, полученном методом MH, обусловливает ослабление взаимодействия свободных электронов с решеткой, что приводит к уменьшению количества энергии, излучаемой материалом, и ослаблению теплового излучения образца.

2.2. Качество поверхности. Пористость покрытия, полученного методом MH, исследовалась с помощью сканирующего электронного микроскопа Zeiss EVO180 и программного обеспечения Image J с использованием алгоритма бинарной экстракции (рис. 4). Пористость покрытия Cr–Ag, полученного методом MH, составляет 1,69 %, пористость покрытия Cr–Ag, полученного методом ГП, — 7,01 %. На рис. 5 приведены диаграммы микротвердости по Виккерсу матрицы из алюминиевого сплава, покрытия Cr–Ag, полученного методом MH, и покрытия Cr–Ag, полученного методом ГП. Микротвердость покрытия, полученного методом MH, на 40,9 % больше микротвердости покрытия, полученного ме-



Рис. 6. Коэффициенты излучения ε различных поверхностей: 1 — матрица из алюминиевого сплава 6061, 2 — (Cr–Ag)-покрытие, полученное методом MH, 3 — (Cr–Ag)-покрытие, полученное методом ГП

тодом ГП. Это обусловлено тем, что в процессе покрытия методом МН из мишени извлекаются высокоэнергетические ионы для бомбардировки матрицы, при этом повышается компактность покрытия. При распылении атомов серебра высокоэнергетическими ионами аргона, энергия которых зависит от энергии переноса заряда — энергии ионов, движущихся в вакуумной камере, ионы серебра при бомбардировке поверхностей покрытия и матрицы осаждаются под действием смещающего давления. Кроме того, под действием смещающего давления притягиваются некоторые ионы аргона с энергией заряда, которые бомбардируют матрицу, а плохо связанные атомы распыляются с поверхности покрытия. Не распыленные при бомбардировке атомы усиливают сцепление покрытия с матрицей. Чем больше энергия бомбардировки при увеличении давления смещения в определенном диапазоне, тем больше плотность и твердость покрытия. Таким образом, композитное (Cr–Ag)-покрытие поверхности теплозащитного экрана, полученное методом МН, имеет меньшую пористость и бо́льшую твердость.

2.3. Эффективность теплового излучения. Коэффициент излучения является важной характеристикой теплового излучения [10]. На рис. 6 приведены коэффициенты излучения  $\varepsilon$  поверхности алюминиевого сплава 6061, (Cr–Ag)-покрытия, полученного методом МН, и (Cr–Ag)-покрытия, полученного методом ГП, при температуре T = 80 К. Коэффициент излучения подложки из алюминиевого сплава составляет 0,108, в то время как коэффициент инфракрасного (ИК) излучения каждой из поверхностей покрытия значительно меньше. Причина этого различия заключается в том, что на поверхности матрицы оксидный слой содержит в основном ионные кристаллы. Неокисленные металлы представляют собой в основном металлические кристаллы, колебания которых могут генерировать ИК-излучение. Многие свободные электроны в металлических кристаллах отражают ИК-излучение, что препятствует его образованию и поглощению. Мощность излучения оксидного слоя существенно больше мощности излучения неокисленной поверхности металла. На оксид с бо́льшим коэффициентом ИК-излучения наносится (Cr–Ag)-покрытие, поэтому коэффициент излучения поверхности, на которую нанесено покрытие, уменьшается.

Значения коэффициента излучения покрытий, нанесенных методами МН и ГП, составляют 0,018 и 0,068 соответственно. Такое различие значений обусловлено тем, что покрытие, нанесенное методом МН, более гладкое, а распределение элементов серебра на нем более равномерное. Следовательно, бо́льшая часть ИК-лучей отражается атомами серебра.



Рис. 7. Схема процессов излучения (1), отражения (2) и поглощения (3) ИКлучей пористой поверхностью:

a — (Cr–Ag)-покрытие, полученное методом MH, <br/>  $\delta$  — (Cr–Ag)-покрытие, полученное методом <br/>  $\Gamma\Pi$ 



Рис. 8. Используемые в модели конечные элементы: 1 — охлаждающая трубка, 2 — теплозащитный экран

Кроме того, ИК-лучи, падающие на поверхность покрытия, отражаются в зазоре между частицами и поглощаются [11]. Схема взаимодействия пор с ИК-излучением показана на рис. 7. Пористость (Cr–Ag)-покрытия, полученного методом МН, меньше пористости (Cr–Ag)-покрытия, полученного методом ГП. Плотность расположения частиц на поверхности покрытия, полученного методом МН, достаточно большая. Когда ИК-лучи попадают на поверхность слоя серебра, бо́льшая их часть отражается, что приводит к уменьшению коэффициента излучения.

2.4. Численное моделирование. При течении жидкого азота через охлаждающую трубку происходит поглощение тепловой энергии. Параметры физической модели охлаждения жидкостью теплозащитного экрана были введены в программный препроцессор метода конечных элементов. Для построения сетки и решения задачи методом конечных элементов использовался пакет Workbench. При численном моделировании рассматривается две области: область, занятая теплозащитным экраном, и область, занятая охлаждающей трубкой. Используемые в модели конечные элементы показаны на рис. 8. Температура на входе в охлаждающую трубку принята равной 80 K, давление — 0,5 МПа. Для определения распределения температуры использовалась  $(k-\varepsilon)$ -модель турбулентности. В результате численного моделирования определены коэффициенты излучения поверхности без покрытия  $(\varepsilon = 0,108)$ , поверхности с (Cr–Ag)-покрытием, полученным методом МН ( $\varepsilon = 0,018$ ), и поверхности с (Cr–Ag)-покрытием, полученным методом ГП ( $\varepsilon = 0,068$ ).



Рис. 9. Установившееся температурное поле, полученное в результате численного моделирования:

a— экран без покрытия, <br/> b— экран с покрытием, полученным методом МН, <br/> b— экран с покрытием, полученным методом ГП

На рис. 9 приведено распределение температуры в момент времени, когда излучение достигает теплозащитного экрана. Максимальные значения температуры экрана без покрытия, экрана с покрытием, полученным методом МН, и экрана с покрытием, полученным методом ГП, составляют 29,1; 3,0; 12,2 К соответственно. Из результатов численного моделирования следует, что использование покрытия, полученного методом МН, позволяет получить наиболее равномерное распределение температуры на поверхности теплозащитного экрана.

Заключение. Исследовано влияние покрытий теплозащитных экранов, полученных различными методами, на микроструктуру, качество поверхности и тепловые свойства матрицы. Получены следующие результаты.

Поверхность с покрытием, полученным методом MH, является более гладкой, чем поверхность с покрытием, полученным методом  $\Gamma\Pi$ . Пористость поверхности с покрытием, полученным методом MH, на 22,6 % меньше пористости поверхности с покрытием, полученным методом  $\Gamma\Pi$ , а твердость на 22,5 % больше.

Коэффициент излучения поверхности с покрытием, полученным методом MH, равен 0,018, что значительно меньше коэффициента излучения поверхности с покрытием, полученным методом ГП.

Из результатов численного моделирования следует, что распределение температуры в теплозащитном экране с покрытием, полученным методом МН, более равномерное, чем в теплозащитном экране с покрытием, полученным методом ГП.

## ЛИТЕРАТУРА

- Her N., Hur J., Kang K., et al. Progress of the ITER thermal shields // Fusion Engng Design. 2016. V. 109–111. P. 937–941.
- Hur J., Nam K., Her N., et al. Design and structural analysis of ITER thermal shield under transportation environment // Fusion Engng Design. 2019. V. 146. P. 2509–2513.
- 3. Lee Y., Hur J., Park W. W., et al. Study on the impact of non-silver coated area in the ITER vacuum vessel thermal shield // Fusion Engng Design. 2021. V. 165. 112270.
- 4. Lee H. D., Penkov O. V., Kim D. E. Tribological behavior of dual-layer electroless-plated Ag–carbon nanotube coatings // Thin Solid Films. 2013. V. 534. P. 410–416.
- Alirezaei S., Monirvaghefi S. M., Saatchi A., et al. High temperature friction and wear behaviour of Ni–P–Ag–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> hybrid nanocomposite coating // Intern. J. Surface Engng Coatings. 2013. V. 91, iss. 4. P. 207–213.

- Liang P., Xu H.-F., Liu M., et al. Electrochemical performance testing and characterization of silver-plated and graphite-coated 316L stainless steel bipolar plates // Acta Phys.-Chim. Sinica. 2010. V. 26, N 3. P. 595–600.
- Bersirova O. L., Kublanovskii V. S. Corrosion properties of electrodeposited thin coatings // Materials Sci. 2012. V. 48, N 2. P. 197–202.
- Wen C. D., Mudavar I. Modeling the effects of surface roughness on the emissivity of aluminum alloys // Intern. J. Heat Mass Transfer. 2006. V. 49, iss. 23/24. P. 4279–4289.
- Qian G., Feng Y., Li B., et al. Effect of electrical current on the tribological behavior of the Cu–WS<sub>2</sub>–G composites in air and vacuum // Chinese J. Mech. Engng. 2013. V. 26, N 2. P. 384–392.
- Neuer G., Kochendörfer R., Gern F. High temperature behaviour of spectral and total emissivity of CMC materials // High Temperatures — High Pressures. 1995/1996. V. 27/28. P. 183–189.
- Liu Y., Xie J., Luo M., et al. The synthesis and optical properties of Al/MnO<sub>2</sub> composite pigments by ball-milling for low infrared emissivity and low lightness // Progr. Organic Coatings. 2017. V. 108. P. 30–35.

Поступила в редакцию 12/IX 2022 г., после доработки — 23/XI 2022 г. Принята к публикации 28/XI 2022 г.