

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2021-3-37-43>

УДК 621.039.6; 533.9.08; 621.039.66

ИССЛЕДОВАНИЕ КАРБИДИЗАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ ВОЛЬФРАМА ПРИ ПЛАЗМЕННОМ ОБЛУЧЕНИИ

Жанболатова Ф.К., Миниязов А.Ж., Туленберген Т.Р., Соколов И.А., Букина О.С.

Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

E-mail для контактов: kaiyrdy@nnc.kz

В данной работе представлены результаты исследования формирования карбидизированного слоя в различных экспериментальных условиях и выбора оптимальных параметров карбидизации поверхности вольфрама при плазменном облучении. Для исследования влияния температуры поверхности образца вольфрама и длительности плазменного облучения проводились эксперименты при температуре поверхности образца 1300 °С и 1700 °С при длительности облучения 300–2400 с. Анализ результатов исследований показал, что максимальное формирование W_2C на поверхности наблюдается при температуре испытаний 1700 °С. При температуре 1300 °С фазовый состав карбидизированного слоя зависит от длительности плазменного облучения. Согласно данным литературного анализа, образование WC происходит на поверхности вольфрама, из которого атомы углерода диффундируют внутрь, вследствие чего образуется нижележащий слой W_2C . С увеличением флюенса ионов в зависимости от времени облучения и температуры поверхности образца диффузия C в W ускоряется, содержание WC уменьшается, и W_2C становится доминирующим карбидным соединением.

Ключевые слова: метан, карбид вольфрама, покрытие, плазменное облучение, плазма, пучково-плазменный разряд.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, вольфрам и углерод являются наиболее подходящими в качестве материалов, обращенных к плазме, для дивертора термоядерного реактора [1, 2]. В частности, в токамаке КТМ первая стенка будет выполнена из графита, а на подвижно-диверторном устройстве будут размещаться различные материалы, в том числе вольфрам [3]. Наличие различных материалов, а также примесей, в камере установки будет приводить к образованию смешанных слоев на обращенных к плазме поверхностях, которые могут повлиять на взаимодействие с изотопами водорода и гелия из пограничной плазмы. Для исследования диффузии изотопов водорода, гелия и их удержания в вольфраме со смешанными слоями на поверхности, в частности с карбидизированной поверхностью, имитируют процессы совместного осаждения W и C в диверторе токамака различными методами нанесения поверхностных покрытий.

Для получения тонких углеродных пленок на поверхности вольфрама используют различные методы, такие как магнетронное напыление, смешивание плазменных потоков W и C , химическое осаждение C из газовой фазы или испарение C при помощи электронно-лучевого испарителя [4–9].

В ряде работ немецкого профессора К. Линзмайера [6–8] представлены исследования образования карбидов вольфрама после нанесения углеродных пленок на вольфрамовую подложку. Углеродные пленки наносились при комнатной температуре методом испарения с помощью электронно-лучевого испарителя. Зависимость карбидообразования от температуры исследовалась при дальнейшем отжиге вольфрамовой подложки с углеродной пленкой.

Основные результаты работы [6] показывают, что, начиная с температуры 500 °С, начинается образование W_2C . При температуре выше 600 °С эта фаза и весь остаточный углерод превращаются в WC . После нагрева до 1000 °С большая часть углерода прореагировала с вольфрамом с образованием WC . Во всех случаях нужная температура достигалась в течение 600 с и поддерживалась в течение 1800 с.

В работе [8] исследовано взаимодействие углеродных пленок с вольфрамовой подложкой при температуре отжига до 1430 °С. Сильная диффузия C устанавливалась при температурах выше 700 °С, что приводило к проникновению C в объем подложки и образованию карбидов. Первой образующейся карбидной фазой оставался W_2C , и при температурах выше 1200 °С доля WC увеличивалась.

На протяжении последних нескольких лет нами исследуется метод карбидизации поверхности вольфрама с применением плазмы пучково-плазменного разряда на плазменно-пучковой установке (ППУ). Для реализации данного метода в качестве плазмообразующего газа используется метан. Известно, что в системе $W-C$ существуют два карбида: низший карбид вольфрама (W_2C) с гексагональной плотноупакованной решеткой, и высший карбид вольфрама (WC) с простой гексагональной решеткой [10]. На начальном этапе на ППУ были проведены эксперименты по карбидизации вольфрама при температуре поверхности образца 1000 °С с длительностью облучения плазмой 600 с. В этих условиях наблюдались пики невысокой интенсивности кристаллических фаз WC , W_2C [11]. В дальнейших работах были изменены параметры облучения, а именно температура поверхности образца и длительность облучения. Серия экспериментов на ППУ при постоянной температуре по-

верхности образца 1500 °С показала, что при данной температуре, в зависимости от времени облучения, процесс карбидизации может протекать с одновременным или последовательным образованием карбидных фаз W_2C и WC [12].

Карбидизация поверхности вольфрама на ППУ является относительно новым методом, имитирующим процессы осаждения С и образования карбидизированного слоя в диверторе токамака. Тем не менее, анализ литературы показал, что изменение температуры поверхности вольфрамового образца и времени экспозиции, вне зависимости от метода нанесения углеродных пленок, будет оказывать непосредственное влияние на поверхностную карбидизацию вольфрама. Однако вызывает интерес расширение диапазона условий карбидизации на ППУ. В связи с этим в данной работе представлены результаты экспериментальных работ, при которых температура поверхности образцов составляла 1300 °С и 1700 °С при длительности облучения 300–2400 с.

1 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

1.1 Описание установки

Эксперименты по получению карбидизированного слоя на поверхности W проводились на ППУ. ППУ была разработана в рамках создания и эксплуатации казахстанского материаловедческого токамака КТМ для испытаний малогабаритных образцов из конструкционных материалов и оборудования КТМ. Установка ориентирована на универсальность и возможность быстрой переналадки для решения различных специализированных задач.

Основными узлами ППУ являются: электронная пушка, газоразрядная камера пучково-плазменного разряда (ППР), электромагнитная система для создания продольного магнитного поля, вакуумная камера взаимодействия ППП с материалом и диагностическая система плазмы. Общая схема установки приведена на рисунке 1. Подробное описание установки представлено в работах [11–14].

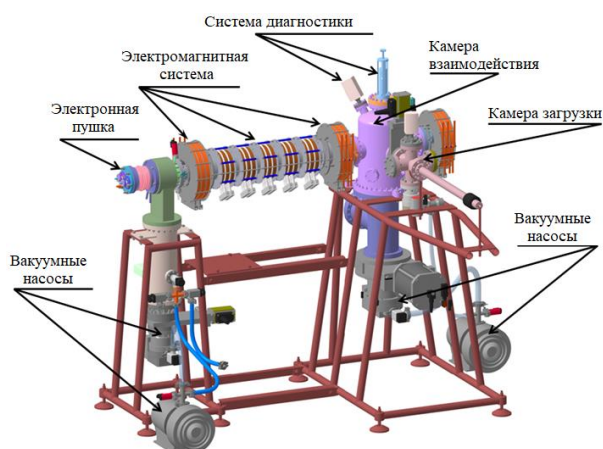


Рисунок 1. Принципиальная схема ППУ

1.2 Материалы и методы исследования

Для исследования влияния температуры и времени облучения на формирование карбидизированного слоя были подготовлены образцы из вольфрамового прутка \varnothing 10 мм марки ВЧ в форме дисков толщиной $2 \pm 0,1$ мм ($S=0,75$ см²). Торцевая сторона (одна) всех заготовок подвергалась механической шлифовке и полировке до степени шероховатости $Ra = 0,02$ мкм. Образцы закреплялись в водоохлаждаемый коллектор при помощи молибденового держателя.

Перед проведением экспериментов по карбидизации образцы вольфрама отжигали на ППУ в режиме электронного пучка [14]. Температура образцов при отжиге составляла 1350 ± 20 °С, длительность – 1 час.

Для карбидизации поверхности вольфрама на ППУ используется плазмообразующий газ в виде метана (CH_4 – 99,998 %). Давление рабочего газа составляло $(1,3–1,4) \cdot 10^{-1}$ Па. Для изменения температуры образцов варьировалась мощность электронного пучка. Энергия ионов задавалась отрицательным потенциалом на мишенный узел и составляла 500 эВ. Условия проведения экспериментов представлены в таблице 1. Облучение проводилось при температуре поверхности образцов 1300 °С и 1700 °С с изменением длительности от 300 с до 2400 с.

Регистрация и контроль температуры на лицевой и тыльной поверхностях образцов осуществлялись с помощью пирометра марки IMPAC ISR 6 Advanced и вольфрам-рениевой термопары типа BP-5/20 с подключением к одноканальному измерителю-регулятору TRM-201, соответственно.

Анализ остаточных газов в камере взаимодействия установки осуществлялся с помощью квадрупольного масспектрометра CIS-100. График парциальных давлений во время проведения экспериментов показан на рисунке 2.

Анализ состава плазмы в камере взаимодействия установки вблизи плоскости образца осуществлялся с помощью оптического спектрометра HR2000+ с регистрацией значений посредством программного обеспечения OceanView при времени интеграции 100 мс. Графики оптических спектров для двух выделенных температур поверхности образца показаны на рисунке 3.

Можно наблюдать линии при 655,9 нм и 485,6 нм, которые близки к первым двум линиям серии Бальмера для водорода H_α , H_β при 656,3 и 486,1 нм. Также присутствует линия 433,5 нм, близкая к третьей линии водорода H_γ (434,0 нм), хотя интенсивность линии меньше, чем у первых двух линий водорода. Наблюдается излучение возбужденных молекул CN около 430 нм. Линии, соответствующие углероду С, находятся в диапазоне длин волн 516–600 нм. Линии двухатомного водорода H_2 наблюдаются в диапазоне 600–640 нм наиболее интенсивно в этой области. Зафиксирован рост интенсивности пиков в зависимости от повышения температуры исследуемых образцов.

Таблица 1. Условия проведения экспериментов на ППУ

Образец	Мощность электронного пучка, Вт	Давление рабочего газа (метан), Па	Ионный ток, мА	Температура поверхности, °С	Длительность облучения, с
1	616	$1,01 \cdot 10^{-1}$	105	1300 ± 10	300
2	1093	$1,02 \cdot 10^{-1}$	153	1700 ± 10	300
3	499	$1,05 \cdot 10^{-1}$	103	1300 ± 10	1200
4	958	$1,03 \cdot 10^{-1}$	142	1700 ± 10	1200
5	530	$1,05 \cdot 10^{-1}$	106	1300 ± 10	1800
6	1086	$1,01 \cdot 10^{-1}$	152	1700 ± 10	1800
7	460	$1,01 \cdot 10^{-1}$	94	1300 ± 10	2400
8	845	$1,10 \cdot 10^{-1}$	136	1700 ± 10	2400

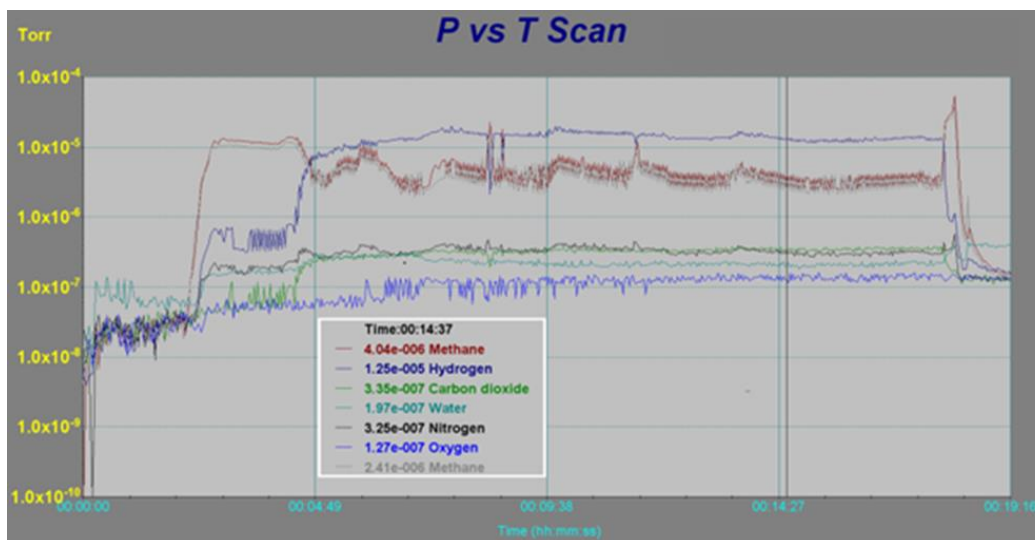


Рисунок 2. График парциальных давлений во время проведения экспериментов при температуре 1300 °С

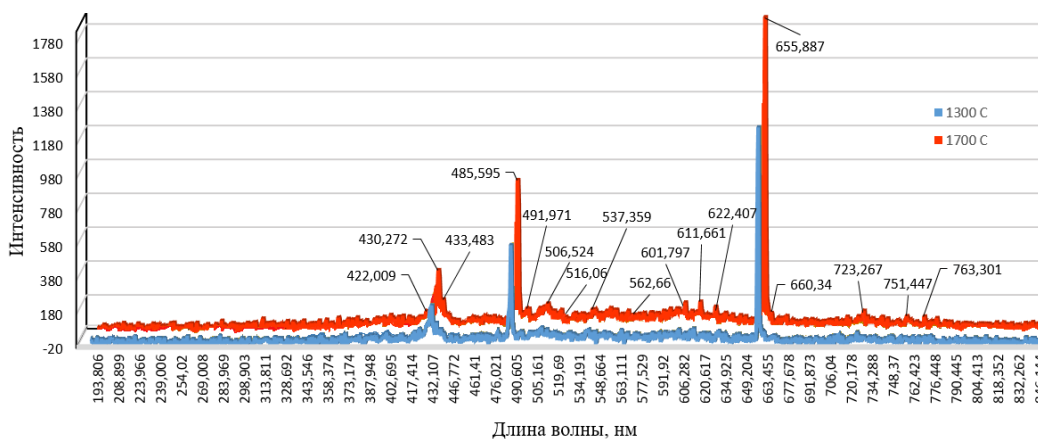


Рисунок 3. Сводный график спектров оптического излучения метановой плазмы (10^{-1} Па) в зависимости от условий проведения экспериментов

Для измерения локальных параметров плазмы использовался цилиндрический зонд Ленгмюра. По формуле Бома, сделана оценка плотности плазмы $n_e \sim 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Оценка температуры теплового электронного компонента плазмы $\tau_e \sim 6,7 \text{ эВ}$.

Съемка рентгеновских дифрактограмм образцов производилась на дифрактометре Empyrean в $\text{Cu K}\alpha$ -излучении, со сканирующим линейным детектором PIXcel1D. Время экспозиции (время на шаг)

при съемках составляло 30,6 с, размер шага сканирования для дифрактограмм $0,026^\circ 2\theta$, исследуемый угловой диапазон $5\text{--}153^\circ 2\theta$. Использовалась фиксированная щель расхождения с угловым расхождением 1° , антирассеивающая щель 2° , маска падающего пучка с маркировкой 20, обеспечивающая ширину падающего пучка 19,9 мм. Для чистого вольфрама толщина слоя проникновения составляет от 1,6 мкм (при угле $2\theta \sim 40^\circ$) до 4,2 мкм (при угле $2\theta \sim 135^\circ$). При ус-

ловии содержания в составе образца карбидов вольфрама в диапазоне составов WC–W₂C, дифрактограммы несут информацию о структурном состоянии материала толщиной от 1,5–1,4 мкм (при угле 2θ ~30°) до 5,5–4,9 мкм (при угле 2θ ~135°).

Обработка дифрактограмм проводилась посредством программы для обработки и поиска “HighScore”. Процедуры обработки исходных дифрактограмм включали в себя отделение и удаление линий, соответствующих излучению Ka₂; определение фона; поиск пиков; поиск соответствия пиков по доступным базам данных без ограничений по известным параметрам; автоматическую идентификацию из списка кандидатов с высшими оценками; подгонку расчетного профиля по всему диапазону углов дифрактограммы с шагом ~40°2θ, при ограничении диапазона интенсивностей от 0 до 10% максимальной интенсивности (подгонка профиля приводит к формированию уточненных числовых значений параметров пиков, необходимых для определения фазового состава, анализа структурного состояния); пересмотр принятых эталонных карточек и поиск карточек в соответствии с известными данными (о химическом составе, пространственной группе и пр.).

Процедуры выполняются с помощью автоматизированной процедуры (“batch operation”) “IdeAll” ПО “HighScore”. Это обеспечивает одинаковость процедур поиска пиков и соответствия им эталонных карточек.

Для идентификации фазового состава использовалась база данных Crystallography Open Database [15] и база данных PDF-2 ICDD Release 2004.

2 РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В процессе анализа фазового состава образцов замечено, что при наложении на дифрактограмму кар-

точек дифрактометрических данных, соответствующих фазе вольфрама, экспериментальные интенсивности пиков не полностью совпадают с штрих-диаграммой применяемой карточки, несмотря на полное соответствие угловых положений. В связи с этим, для идентификации фазового состава, были применены карточки дифрактометрических данных металлического вольфрама № 00-004-0806, W₂C № 03-065-3896 и WC № 00-051-0939 [15]. На полученных дифрактограммах образцов, как видно из рисунка 4, наблюдаются дифракционные пики WC и W₂C.

В образце 1 основной фазой является фаза гексагонального W₂C. Пики низкой интенсивности идентифицируются как пики, принадлежащие WC и металлической фазе W. В фазовом составе образца 2 содержание фазы W₂C и фазы металлического W практически одинаково. Фаза WC отсутствует. В составе образца 3 основной фазой также является фаза W₂C гексагональной сингонии. Пики малой интенсивности идентифицируются как пики, принадлежащие фазе металлического W и фазе W₂C. Наивысшее содержание W₂C (более 95%) получено в фазовом составе поверхности образцов 4, 6, 8. Пики очень малой интенсивности, едва различимые над уровнем фона, идентифицируются как пики, принадлежащие фазе металлического W. В фазовом составе образца 5 основной фазой является W₂C, пики WC имеют меньшую интенсивность, а фаза металлического W исчезает. В составе образца 7 основной фазой является фаза WC гексагональной сингонии. Пики малой интенсивности идентифицируются как пики, принадлежащие фазе W₂C.

Результаты полуколичественного содержания рентгенофазового анализа образцов представлены в таблице 2.

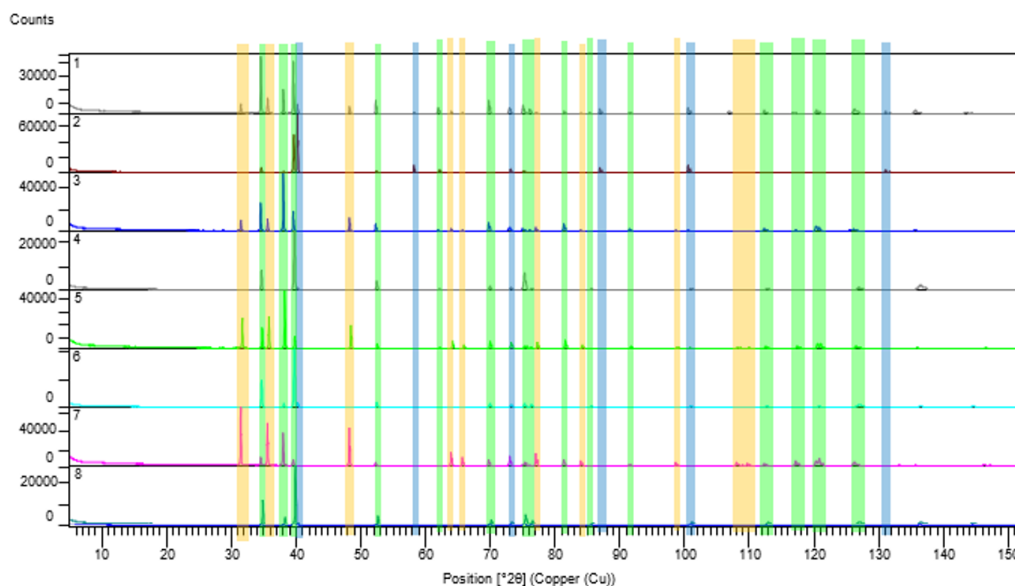


Рисунок 4. Дифрактограммы исследованных образцов (оранжевым цветом отмечены места локализации пиков фазы WC, зеленым – фазы W₂C, голубым – пики W)

Таблица 2. Результаты полуколичественного фазового анализа образцов

Образец	W (куб.)	WC (гекс., P-6m2)	W ₂ C (гекс., P-31m)
1	7,9	15,2	77,0
2	52,8	–	47,2
3	–	16,5	83,5
4	1,4	–	98,6
5	–	28,2	71,8
6	4,5	–	95,5
7	–	86,1	13,9
8	0,4	–	99,6

Согласно результатам рентгенофазового анализа диффузия углерода в вольфрам с одновременным образованием двух фаз карбидов вольфрама происходит после облучения уже при температуре 1300 °С. Однако, при данной температуре фазовое содержание отличается в зависимости от длительности облучения. Так при длительности облучения 2400 с основной фазой является фаза WC гексагональной сингонии, что объясняется увеличением флюенса ионов в зависимости от времени облучения.

Из таблицы 2 видно, что после облучения образцов при температуре 1700 °С содержание фазы вольфрама на поверхности образца близко к нулю, указывая на то, что металлический вольфрам в приповерхностной области полностью прореагировал. Полученные результаты хорошо согласуются с литературными данными [6–9]. Наивысшее содержание фазы W₂C после облучения при температуре 1700 °С вне зависимости от длительности облучения объясняется ускорением диффузии С в W при высокой температуре.

Представленные результаты экспериментальных работ подтверждают предположение о влиянии температуры поверхности вольфрамового образца и времени его нахождения в среде CH₄ при плазменном облучении на формирование карбидизированного слоя на поверхности вольфрама.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе были проведены исследования по формированию карбидизированного слоя на поверхности вольфрама в различных экспериментальных условиях с изменением температуры поверхности образца и длительности облучения в среде метана. Преимущества такого метода, реализованного на ППУ, заключается в создании условий для химических реакций и физических процессов, приближенных к возможным в термоядерных установках.

Анализ результатов исследований показал, что максимальное формирование W₂C на поверхности наблюдается при температуре 1700 °С. При температуре 1300 °С фазовый состав карбидизированного слоя зависит от длительности плазменного облучения. Согласно данным литературного анализа, образование WC происходит на поверхности вольфрама,

из которого внутрь частицы диффундирует С и образует нижележащий слой W₂C. С увеличением флюенса ионов в зависимости от времени облучения и температуры поверхности образца диффузия С в W ускоряется, содержание WC уменьшается, и W₂C становится доминирующим карбидным соединением.

Можно сделать вывод о том, что при плазменном облучении на ППУ температура поверхности образца и длительность облучения оказывают существенное влияние на карбидизацию поверхности вольфрама.

Данная работа выполнена в рамках научно-технической программы № BR09158585 «Научно-техническое обеспечение экспериментальных исследований на казахстанском материаловедческом токамаке KTM».

ЛИТЕРАТУРА

1. M. Merola, F. Escourbiac, R. Raffray, P. Chappuis, T. Hirai, A. Martin. Overview and status of ITER internal components // Fusion Eng. Des. – 2014. – V. 89. – P. 890–895.
2. S.E. Lee, Y. Hatano, M. Tokitani et al. Global distribution of tritium in JET with the ITER-like wall // Nuclear Materials and Energy. – 2021. – Vol. 26. – P. 100930
3. Tazhibayeva I.L. [et al.] KTM Experimental Complex Project Status // Fusion Science and Technology. – Vol. 47. – 2005. – P. 746–750.
4. Michael B.Z., Jingguang G.C. Synthesis, characterization and surface reactivity of tungsten carbide (WC) PVD films // Surface Science. – 2014. – Vol. 569. – P. 89–98.
5. Romanusa H., Cimallaa V., Schaefera J.A., Spieüb L., Eckec G., Pezoldtc J. Preparation of single phase tungsten carbide by annealing of sputtered tungsten-carbon layers // Thin Solid Films. – 2000. – Vol. 359. – P. 146–149.
6. J. Luthin, Ch. Linsmeier. Carbon films and carbide formation on tungsten // Surface Science. – 2000. – Vol. 454–456. – P. 78–82.
7. Ch. Linsmeier, J. Luthin, K. U. Klages, A. Wiltner and P. Goldstraß. Formation and Erosion of Carbon-Containing Mixed Materials on Metals // Physica Scripta. – 2004. – Vol. T111. – P. 86–91.
8. Ch. Linsmeier, M. Reinelt, K. Schmid. Surface chemistry of first wall materials – From fundamental data to modeling // Journal of Nuclear Materials. – 2011. – Vol. 415. – P. S212–S218.
9. P. Wang, W. Jacob. Deuterium diffusion and retention in a tungsten-carbon multilayer system // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. – 2014. – Vol. 329. – P. 6–13
10. Павлов Б.А., Терентьев А.П. Курс органической химии. – Издание шестое, стереотипное. – М.: Изд-во Химия, 1967. – С. 58.
11. Соколов И.А., Скаков М.К., Миниязов А.Ж., Туленберген Т.Р. Изучение процессов образования карбидов на поверхности дивертора термоядерного реактора. – Вестник КазНАЕН. – 2019. – Вып. 1. – С. 44–49.
12. Жанболатова Ғ.Қ., Бакланов В.В., Туленберген Т.Р., Миниязов А.Ж., Соколов И.А. Карбидизация поверхности вольфрама в пучково-плазменном разряде. – Вестник НЯЦ РК. – 2020. – Вып. 4. – С. 77–81.

13. Патент РК № 2080. Имитационный стенд с плазменно-пучковой установкой / Колодешников А.А., Зуев В.А., Гановичев Д.А., Туленберген Т.Р. [и др.]; заявитель и патентообладатель РГП НЯЦ РК. – № 2016/0108.2; заявл. 29.02.2016; опубл. 15.03.2017, Бюл. № 5. – 3 с.
14. Kurnae V., Vizgalov I., Gutorov K., Tulenbergenov T., Sokolov I., Kolodeshnikov A., Ignashev V., Zuev V., Bogomolova I., Klimov N. Investigation of plasma-surface interaction at plasma beam facilities // Journal of Nuclear Materials. – 2015. – Vol. 463. – P. 228–232. – <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnucmat.2014.12.076>.
15. Gražulis S., Chateigner D., Downs R.T., Yokochi A.F.T., Quirós M., Lutterotti L., Manakova E., Butkus J., Moeck P. and Le Bail A. Crystallography Open Database – an open-access collection of crystal structures // J. Appl. Cryst. – 2009. – Vol. 42. – P. 726–729.
7. Ch. Linsmeier, J. Luthin, K. U. Klages, A. Wiltner and P. Goldstraf. Formation and Erosion of Carbon-Containing Mixed Materials on Metals // Physica Scripta. – 2004. – Vol. T111. – P. 86–91.
8. Ch. Linsmeier, M. Reinelt, K. Schmid. Surface chemistry of first wall materials – From fundamental data to modeling // Journal of Nuclear Materials. – 2011. – Vol. 415. – P. S212–S218.
9. P. Wang, W. Jacob. Deuterium diffusion and retention in a tungsten-carbon multilayer system // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. – 2014. – Vol. 329. – P. 6–13.
10. Pavlov B.A., Terent'ev A.P. Kurs organicheskoy khimii. – Izdanie shestoe, stereotipnoe. – Moscow.: Izd-vo Khimiiya, 1967. – P. 58.
11. Sokolov I.A., Skakov M.K., Miniayazov A.Zh., Tulenbergenov T.R. Izuchenie protsessov obrazovaniya karbidov na poverkhnosti divertora termoyadernogo reaktora. – Vestnik KazNAEN. – 2019. – Issue 1. – P. 44–49.
12. Zhanbolatova F.K., Baklanov V.V., Tulenbergenov T.R., Miniayazov A.Zh., Sokolov I.A. Karbidizatsiya poverkhnosti vol'frama v puchkovno-plazmennom razryade. – Vestnik NYaTs RK. – 2020. – Issue 4. – P. 77–81.
13. Патент РК № 2080. Имитационный стенд с плазменно-пучковой установкой / Колодешников А.А., Зуев В.А., Гановичев Д.А., Туленберген Т.Р. [и др.]; заявитель и патентообладатель РГП НЯЦ РК. – № 2016/0108.2; заявл. 29.02.2016; опубл. 15.03.2017, Бюл. № 5. – 3 с.
14. Kurnae V., Vizgalov I., Gutorov K., Tulenbergenov T., Sokolov I., Kolodeshnikov A., Ignashev V., Zuev V., Bogomolova I., Klimov N. Investigation of plasma-surface interaction at plasma beam facilities // Journal of Nuclear Materials. – 2015. – Vol. 463. – P. 228–232. – <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnucmat.2014.12.076>.
15. Gražulis S., Chateigner D., Downs R.T., Yokochi A.F.T., Quirós M., Lutterotti L., Manakova E., Butkus J., Moeck P. and Le Bail A. Crystallography Open Database – an open-access collection of crystal structures // J. Appl. Cryst. – 2009. – Vol. 42. – P. 726–729.

REFERENCES

1. M. Merola, F. Escourbiac, R. Raffray, P. Chappuis, T. Hirai, A. Martin. Overview and status of ITER internal components // Fusion Eng. Des. – 2014. – V. 89. – P. 890–895.
2. S.E. Lee, Y. Hatano, M. Tokitani et al. Global distribution of tritium in JET with the ITER-like wall // Nuclear Materials and Energy. – 2021. – Vol. 26. – P. 100930.
3. Tazhibayeva I.L. [et al.] KTM Experimental Complex Project Status // Fusion Science and Technology. – Vol. 47. – 2005. – P. 746–750.
4. Michael B.Z., Jingguang G.C. Synthesis, characterization and surface reactivity of tungsten carbide (WC) PVD films // Surface Science. – Vol. 569. – P. 89–98.
5. Romanusa H., Cimallaa V., Schaefera J.A., Spieüb L., Eckec G., Pezoldtc J. Preparation of single phase tungsten carbide by annealing of sputtered tungsten-carbon layers // Thin Solid Films. – 2000. – Vol. 359. – P. 146–149.
6. J. Luthin, Ch. Linsmeier. Carbon films and carbide formation on tungsten // Surface Science. – 2000. – Vol. 454–456. – P. 78–82.

ПЛАЗМАЛЫҚ СӘУЛЕЛЕНУ КЕЗІНДЕГІ ВОЛЬФРАМ БЕТІНІҢ КАРБИДИЗАЦИЯЛАНУЫН ЗЕРТТЕУ

Ғ.Қ. Жанболатова, А.Ж. Миниязов, Т.Р. Туленберген, И.А. Соколов, О.С. Букина

ҚР ҰАО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

Бұл жұмыста әртүрлі тәжірибелік жағдайларда карбидтелген қабаттың түзілуін зерттеу нәтижелері және плазмалық сәулелену кезінде вольфрам бетін карбидизациялаудың оңтайлы параметрлерін таңдау берілген. Вольфрам үлгісінің бетінің температурасының әсерін және плазмалық сәулелену ұзақтығын зерттеу үшін 300–2400 с сәулелену ұзақтығымен 1300 °C және 1700 °C үлгі бетінің температурасында эксперименттер жүргізілді. Зерттеу нәтижелерін талдау бетінде W₂C максималды түзілуі 1700 °C сынақ температурасында байқалатынын көрсетті. 1300 °C температурада карбидтелген қабаттың фазалық құрамы плазмалық сәулелену ұзақтығына байланысты. Әдебиеттік талдауға сәйкес WC түзілуі вольфрам бетінде жүреді, одан С бөлшекке диффузияланып, W₂C астындағы қабаттың құрайды. Сәулелену уақытына және үлгі бетінің температурасына байланысты иондар ағынының жоғарылауымен С-тың W-ға диффузиясы жылдамдайды, WC құрамы төмендейді, ал W₂C басым карбид қосылысына айналады.

Түйін сөздер: метан, вольфрам карбиді, жабын, плазмалы сәулелену, плазма, шоқтық-плазмалық разряды.

INVESTIGATION OF TUNGSTEN SURFACE CARBIDIZATION
UNDER PLASMA IRRADIATION

G.K. Zhanbolatova, A.Zh. Miniyazov, T.R. Tulenbergenov, I.A. Sokolov, O.S. Bukina

Branch "Institute of Atomic Energy" RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

This paper presents the results of a study of the formation of a carbidized layer under various experimental conditions and the choice of optimal parameters for carbidization of a tungsten surface under plasma irradiation. To study the effect of the surface temperature of a tungsten sample and the duration of plasma irradiation, experiments were carried out at a sample surface temperature of 1300 °C and 1700 °C with an irradiation duration of 300–2400 s. Analysis of the research results showed that the maximum formation of W_2C on the surface is observed at a test temperature of 1700 °C. At a temperature of 1300 °C, the phase composition of the carbidized layer depends on the duration of plasma irradiation. According to the literature analysis, the formation of WC occurs on the surface of tungsten, from which C diffuses into the particle and forms the underlying layer of W_2C . With an increase in the ion fluence, depending on the irradiation time and the temperature of the sample surface, the diffusion of C into W accelerates, the WC content decreases, and W_2C becomes the dominant carbide compound.

Keywords: *methane, tungsten carbide, coating, plasma irradiation, plasma, beam-plasma discharge.*