МЕТАЛЛЫ, №6 · 2023
с. 90—97 **DOI:** 10.31857/S0869573323060113, **EDN:** elhkdm

УДК 546.655.4

ВЛИЯНИЕ ОТЖИГА НА СТРУКТУРУ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ДИОКСИДА ЦЕРИЯ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ[1]

©2023 г. **Е.О. Насакина, М.А. Сударчикова, А.С. Баикин, А.А. Мельникова, А.В. Михайлова, Н.А. Дормидонтов, П.А. Прокофьев, С.В. Конушкин, К.В. Сергиенко, М.А. Каплан, М.А. Севостьянов, А.Г. Колмаков**

ФГБУН Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН), Москва
E-mail: nacakina@mail.ru

Поступила в редакцию 11 мая 2023 г.
После доработки 27 июля 2023 г. принята к публикации 14 августа 2023 г.

Методом магнетронного распыления с применением последующего отжига получены нано- и микроразмерные поверхностные слои диоксида церия CeO_2 на основе титанового сплава ВТ6. Структуру образцов определяли с помощью сканирующей электронной микроскопии, электронной Оже-спектроскопии, энергодисперсионной спектроскопии и рентгеновской дифрактометрии. Показаны линейная зависимость толщины поверхностного слоя от длительности его осаждения и нелинейный ее рост при увеличении мощности источника питания, увеличение шероховатости поверхности, расслаивание и разрыхление поверхностного слоя, предположительно связанные с отжигом. В образцах с поверхностным слоем тоньше 750 нм обнаружено формирование подслоя TiO_2, Al_2O_3 и $CeVO_4$, а при слое <300 нм весь диоксид церия расходовался на объединение с диоксидом ванадия до ванадата.

Ключевые слова: магнетронное распыление; диоксид церия; отжиг; твердость;

Диоксид церия все более широко используется в ряде наукоемких отраслей промышленности, в частности для производства электрохимических элементов [1—8], фотокатализа [9, 10], катализа [11, 12], для создания новых видов тепловых барьеров, теплоизоляционных материалов [13—15], просветляющих покрытий для солнечных батарей [16], оптических приборов [17] и др., благодаря высоким температуре плавления и коэффициенту теплового расширения, низкой теплопроводности и валентному переходу Ce^{3+}—Ce^{4+}. Оксид церия уже давно используется в качестве полирующего материала из-за его абразивных свойств. Благодаря относительно низкой токсичности он считается потенциальным заменителем хрома в антикоррозионных защитных покрытиях [18, 19]. В то же время отмечается как нейтральное, а в ряде случаев в опытах in vitro и in vivo даже стимулирующее, так и однозначно отрицательное его действие [20—23]. Показано, что свойства оксида церия зависят от размерного фактора [24], поверхностного заряда [25], способа получения [26, 27] и концентрации [28].

В связи с этим ведутся исследования разных методов получения покрытий из оксида церия, в том числе плазмохимического осаждения из паровой фазы [29], импульсного лазерного осаждения [30] и магнетронного катодного напыления [31—39]. Одной из основных проблем при этом является формирование поверхностного слоя не из чистого CeO_2, а его смеси с нестехиометрическим Ce_2O_3, что ведет к снижению механических, гидрофобных и других свойств, поэтому многие современные работы направлены на поиск наилучших методов, приводящих к формированию единой стехиометрической фазы. Один из таких методов включает отжиг, следующий за процессом осаж-

[1]Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 21-73-00268, https://rscf.ru/project/21-73-00268/.

дения покрытия из металлического церия или его оксидов [35, 36, 38, 39].

В данной работе исследовалось влияние постотжига на формирование методом магнетронного распыления слоистых композиционных материалов с поверхностным слоем из диоксида церия на основе титанового сплава ВТ6 медицинского назначения.

Материалы и методика эксперимента. Создание слоистых композиционных материалов проводили с использованием магнетрона на постоянном токе в газовой среде аргона на установке Torr International (США).

При использовании для создания поверхностных слоев метода магнетронного распыления исключается перегрев подложки бомбардирующими электронами благодаря их удержанию у распыляемой мишени, что крайне важно для материалов подложки с низкими температурами плавления или с чувствительной к температурным изменениям фазовой структурой, как, например, сверхупругие титановые сплавы. Термическая обработка дает возможность варьировать статические свойства и циклические нагрузки в условиях эксплуатации с широким диапазоном деформаций и чрезвычайно важна для стабилизации свойств, формования изделий и успешного применения продукта.

В качестве распыляемой мишени использовались диски из химически чистого церия. В связи с активным окислением церия в кислородсодержащей среде перед каждым напылением поверхность мишени зачищалась, в том числе с помощью ионного травления. В качестве основы для композитов использовались пластины из титанового сплава ВТ6 размером 10×10×0,5 мм. Предварительно пластины обрабатывали в течение 5 мин с помощью препарата Polinox (ООО «Джитул», Россия), представляющего собой смесь азотной, плавиковой и серной кислот в глицерине. Для очистки, активации и полировки поверхность подложки перед напылением подвергалась предварительному ионному травлению бомбардировкой ионами аргона в течение 3 мин при напряжении и силе тока $U_э$ = 900 В и $I_э$ = 80 мА соответственно.

Поверхностные слои получали при следующих условиях процесса: $I \approx 135—865$ мА, $U \approx 323—347$ В, мощность источника питания $P_{расп} \approx 43—300$ Вт (в данной работе это соответствует диапазону $P_{расп}$, обозначенному как 10—70%); длительность напыления $\tau_{расп}$ = 5—30 мин; дистанция напыления (расстояние от мишени до подложки) 150 мм. Температура на поверхности подложек не превышала 150 °С. Рабочее и остаточное давления в вакуумной камере составляли соответственно ~0,4 и $4 \cdot 10^{-4}$ Па. Через 2 сут после осаждения для естественного снятия активации новообразованной поверхности образцы отжигали в кислородсодержащей среде при температуре 400 °С.

Морфологию и послойный элементный состав поверхности материалов исследовали на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Hitachi TM4000 (Япония), снабженном приставкой для энергодисперсионного анализа (ЭДА), электронном Оже-спектрометре JAMP-9500F (JEOL, Япония) в сочетании с ионным травлением при бомбардировке аргоном под углом 30°. Рентгеновские дифрактограммы при проведении рентгенофазового анализа (РФА) получены на приборе ДРОН-3М («Буревестник», Россия) в CoK_α-излучении в геометрии параллельного пучка.

Рельеф и топографию поверхности образцов исследовали методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) на комплексе Solver Pro M (NT-MDT, Россия) полуконтактным методом.

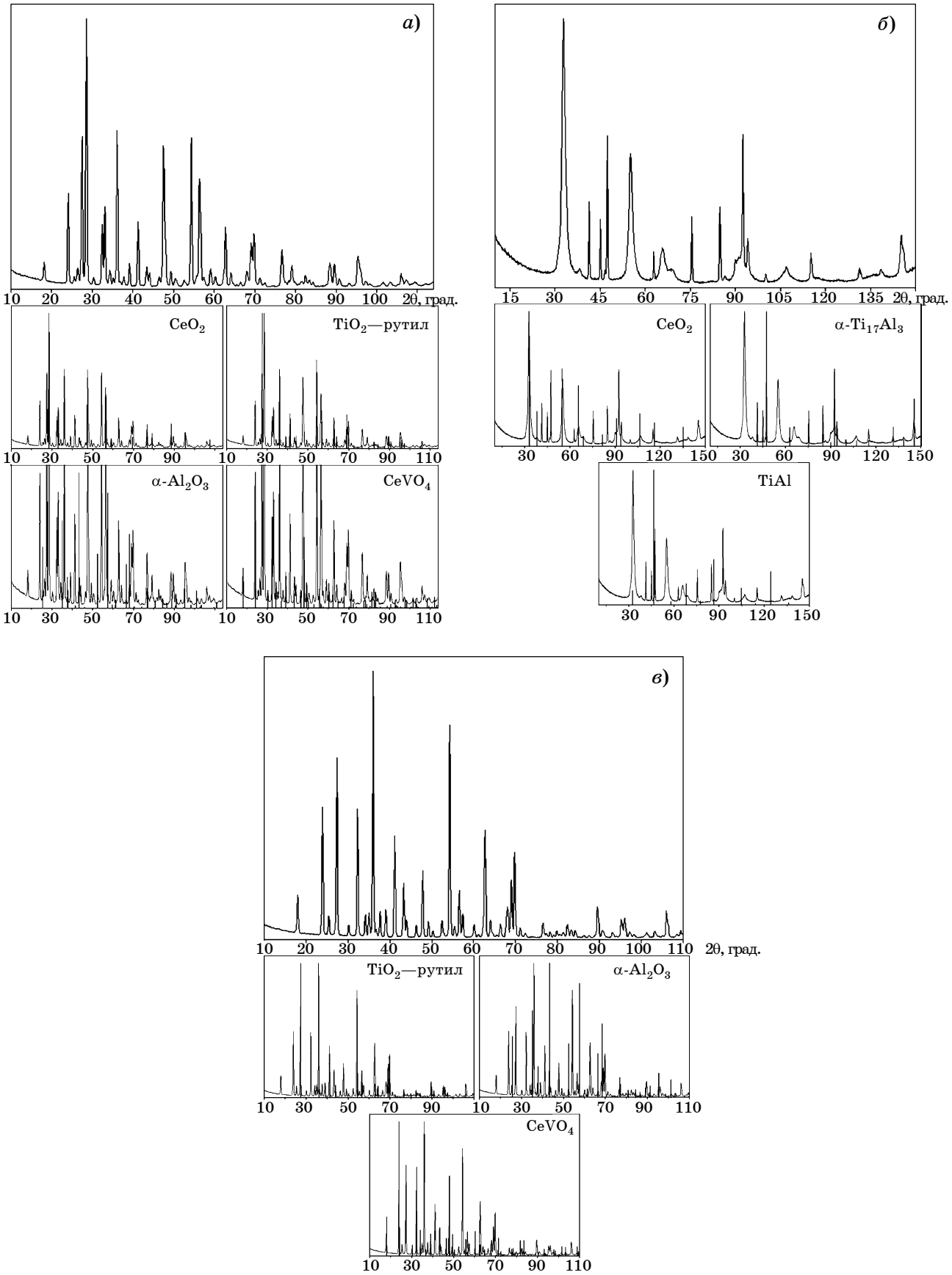
Результаты исследований и их обсуждение. В зависимости от изменяемых параметров (длительность и мощность распыления) получали поверхностные слои диоксида церия толщиной от десятков до почти тысячи нанометров (табл. 1). Было отмечено, что при толщине поверхностного слоя <750 нм наряду с диоксидом церия образуются оксиды металлов подложки в виде TiO_2,

Таблица 1

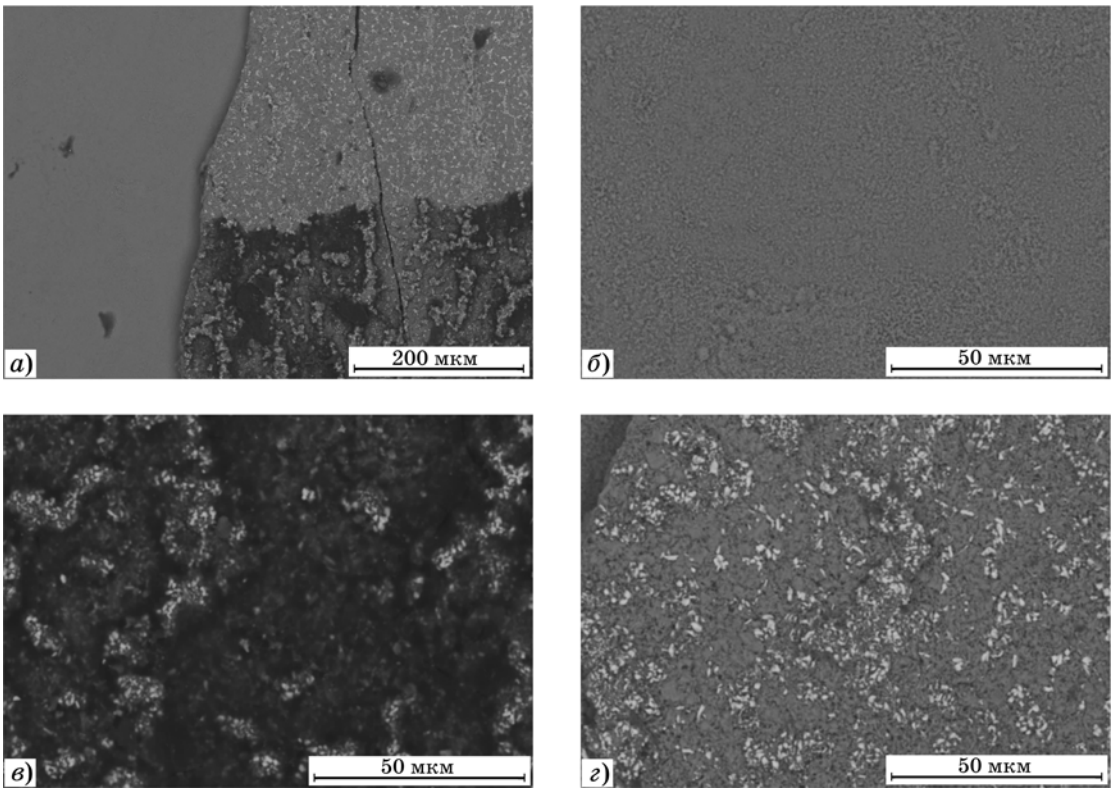
Характеристика полученных образцов композиционного материала CeO_2-ВТ6 по данным РФА и СЭМ

$\tau_{расп}$, мин	Толщина слоя диоксида церия, нм, при мощности распыления, %			
	20	30	50	70
30	210**	703*	790	943
20	—	468,8*	516*	—
12,5	—	293**	326*	—
5	35**	120**	132**	157**

*Отмечен подслой из TiO_2, Al_2O_3 и $CeVO_4$.
**Оксид церия только в виде $CeVO_4$.



Фиг. 1. Результаты РФА образцов композиционного материала CeO_2-ВТ6, полученных при разных условиях: *а* — мощность распыления 50%, за 20 мин; *б* — то же, за 30 мин; *в* — мощность распыления 30%, за 12,5 мин



Фиг. 2. Результаты исследования СЭМ образца композиционного материала CeO_2-ВТ6, полученного при мощности распыления 50% за 20 мин: *а* — общий вид расслоившегося материала; *б—г* — три зоны анализа, соответствующие табл. 2

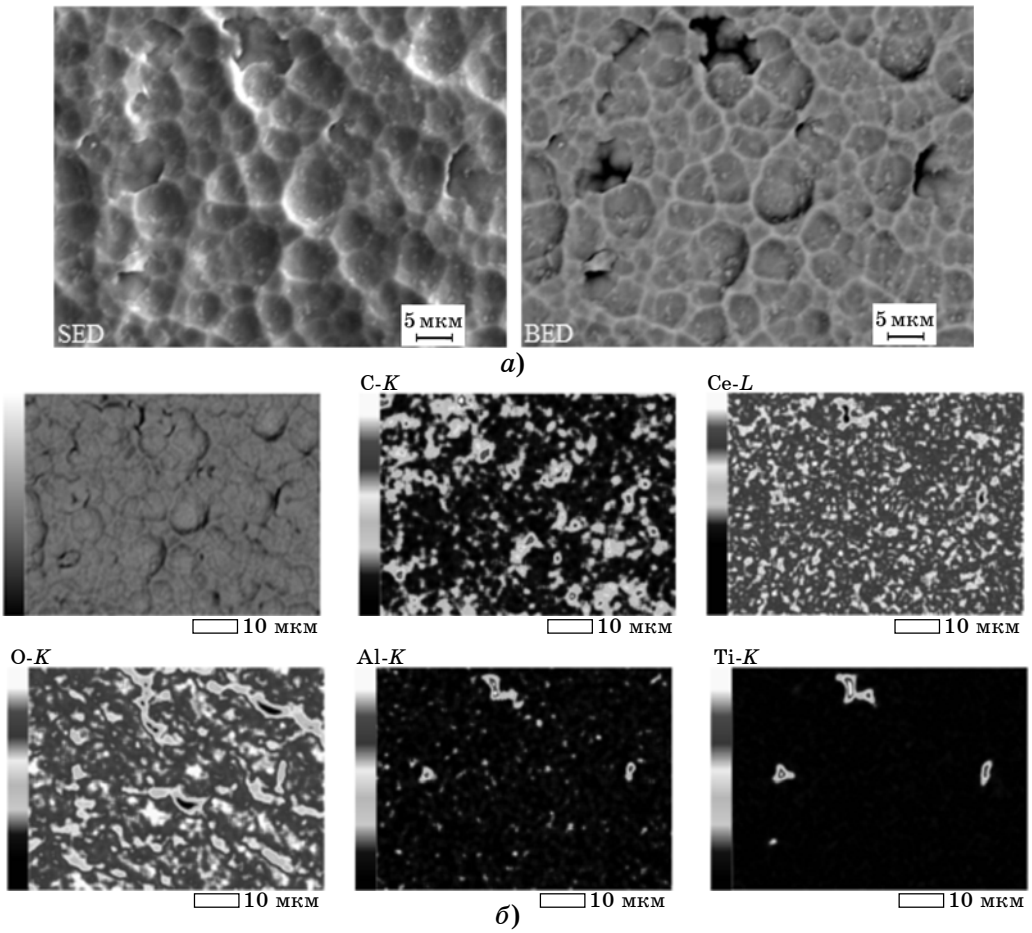
Al_2O_3 и $CeVO_4$, которых не было в слое большей толщины, причем при толщине слоя <300 нм весь диоксид церия расходуется на взаимодействие с диоксидом ванадия до ванадата (фиг. 1). На фиг. 2, *а* видно расслоение полученного материала на три зоны, в каждой из которых был проведен анализ химического состава (фиг. 2, *б—г*; табл. 2). По результатам анализа зоны были определены соответственно как подложка, верхний слой диоксида церия и смешанный оксидный слой между ними. Предположительно, из оксидов остальных металлов формируется подслой под слоем CeO_2, если толщина последнего позволяет избытку кислорода продиффундировать в подложку. Формирование слоя диоксида церия стехиометрического состава независимо от условий осаждения происходит в виде самостоятельного слоя, отвечающего по фазовому составу набору дифракционных пиков при значениях 2θ, град.: 28,61; 33,14; 47,57; 56,35; 59,13 и др., что соответствует плоскостям (111), (200), (220), (311), (222) и др., т.е. плоскостям кубической структуры типа флюорит с пространственной группой F*m*3*m* (см. фиг. 1).

Таблица 2

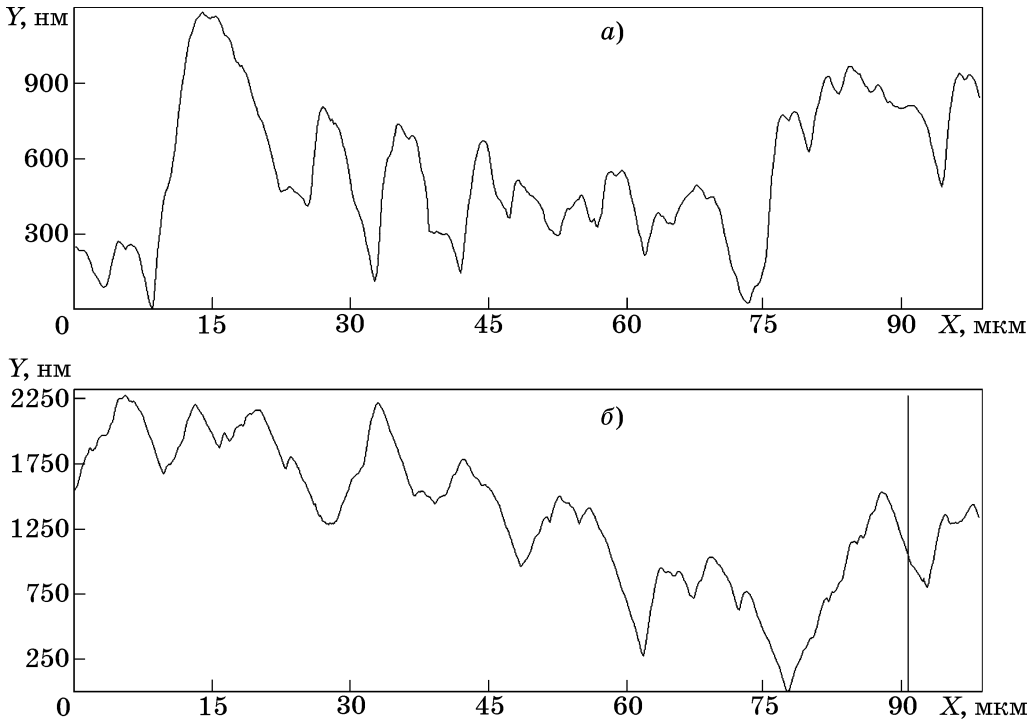
Результаты послойного ЭДА образца композиционного материала CeO_2-ВТ6, полученного при мощности распыления 50% за 20 мин (см. фиг. 2, *б—г*)

Зона анализа	Содержание элемента, ат.%				
	O	Al	Ti	V	Ce
б	68,9	6,1	25,1	—	—
в	60,4	11,3	19,6	2,0	2,3
г	65,24	—	2,76	1,06	29

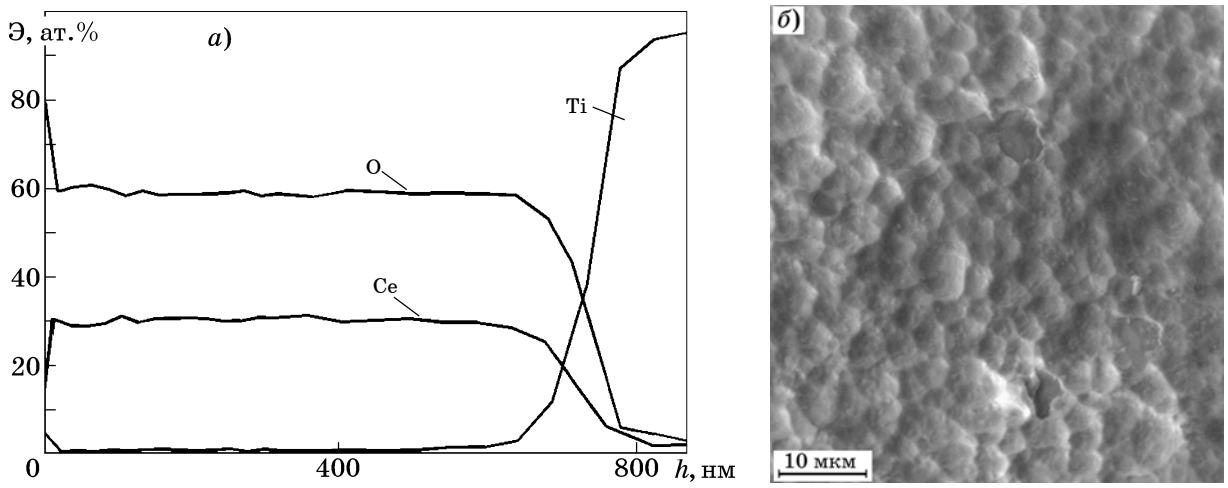
Наблюдалось линейное увеличение толщины слоя с ростом длительности осаждения при любой мощности распыления (см. табл. 1), что согласуется с данными предыдущих исследований других металлов — тантала и титана [40, 41], а также работ по получению покрытия CeO_2 на кремниевых подложках [36, 38, 39]. С ростом мощности в пределах одного значения длительности осаждения толщина поверхностного слоя также возрастала, однако с сильными отклонениями от линейной закономерности (см. табл. 1). Поскольку на многих образцах наблюдались дефекты в поверхности, отслаивание маленьких (микроразмерных) и довольно крупных



Фиг. 3. СЭМ-изображение поверхности (*а*) и результаты элементного картирования (*б*) для образца композиционного материала CeO_2-ВТ6, полученного при мощности распыления 70% за 30 мин



Фиг. 4. Профиль поверхности исходной подложки образца композиционного материала CeO_2-ВТ6, полученного при мощности распыления 30% за 12,5 мин, до (*а*) и после (*б*) отжига



Фиг. 5. Профиль распределения элементов (Э) по глубине h в поверхностной области образца композиционного материала CeO_2-ВТ6, полученного при мощности распыления 50% за 30 мин (*а*) и исследования СЭМ анализируемой области (*б*)

(миллиметровых) участков по толщине поверхностного слоя (см. фиг. 2), флуктуации значений толщин от общей закономерности могут быть объяснены потерей части покрытия. В то же время разрыхлением поверхности после релаксации и рекристаллизации, вызванной отжигом [32, 35, 39], можно объяснить и увеличение мнимой толщины поверхностного слоя. Например, на фиг. 3, *а* можно наблюдать рыхлые поры через весь поверхностный слой почти микроразмерной толщины до подложки.

Также отмечается, что увеличение количества кислорода влияет на размер получаемого зерна CeO_2; наряду с измельчением зерна отмечается рост шероховатости [33, 37—39], что видно на фиг. 4, тогда как высокая шероховатость в случае тонких поверхностных слоев существенную влияет на результаты анализа.

О послойном химическом составе и морфологии поверхности композиционного материала без подслоя оксидов остальных металлов можно судить по данным фиг. 5. Результаты химического анализа показали высокую сходимость во всех точках анализа.

Таким образом, в целом отжиг, следующий за осаждением оксида церия, показал неудовлетворительные результаты, поэтому не рекомендован как стадия технологии получения стехиометрического диоксида церия.

Выводы. 1. Получены слоистые композиционные материалы с поверхностными слоями диоксида церия стехиометрического состава толщиной от 35 до 943 нм и основой из титанового сплава ВТ6.

2. Отмечены линейная зависимость толщины поверхностного слоя от длительности его осаждения, нелинейный рост толщины слоя при увеличении мощности распыления, увеличение шероховатости поверхности, расслаивание и разрыхление поверхностного слоя, предположительно связанные с проводимым после осаждения отжигом.

3. В образцах с поверхностным слоем <750 нм выявлено формирование подслоя оксидов TiO_2, Al_2O_3 и $CeVO_4$, а при толщине слоя <300 нм весь диоксид церия расходуется на объединение с диоксидом ванадия до ванадата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Lee, W.* Oxygen surface exchange at grain boundaries of oxide ion conductors / W. Lee, H.J. Jung, M.H. Lee, Y.B. Kim, J.S. Park, R. Sinclair, F.B. Prinz // Adv. Funct. Mater. 2012. V.22. P.965—971. DOI : 10.1002/adfm.201101996.
2. *Cho, S.* Microstructural and electrical properties of $Ce_{0,9}Gd_{0,1}O_{1,95}$ thin-film electrolyte in solid-oxide fuel cells / Cho S., Yoon J., Kim J.H., Zhang X., A. Manthiram, Wang H. // J. Mater. Res. 2011. V.26. P.854—859. DOI : 10.1557/jmr.2010.72.
3. *Sønderby, S.* Strontium diffusion in magnetron sputtered gadolinia-doped ceria thin film barrier coatings for solid oxide fuel cells / S. Sønderby, P.L. Popa, J. Lu, B.H. Christensen, K.P. Almtoft, L.P. Nielsen, P. Eklund // Adv. Energy Mater. 2013. №3. P.923—929. DOI : 10.1002/aenm.201300003.
4. *Tian, D.* Enhanced performance of symmetrical solid oxide fuel cells using a doped ceria buffer layer / Tian D., Lin B., Yang Y., Chen Y., Lu X., Wang Z., Liu W., Traversa E. // Electrochim. Acta. 2016. V.208. P.318—324. DOI : 10.1016/j.electacta.2016.04.189.

5. *Jaiswal, N.* A brief review on ceria based solid electrolytes for solid oxide fuel cells / N. Jaiswal, K. Tanwar, R. Suman, D. Kumar, S. Uppadhya, O. Parkash // J. Alloys Compd. 2019. V.781. P.984—1005. DOI : 10.1016/j.jallcom.2018.12.015.
6. *Raza, R.* Functional ceria-based nanocomposites for advanced low-temperature (300—600 °C) solid oxide fuel cell : a comprehensive review / R. Raza, Zhu B., A. Rafique, M.R. Naqvi, P. Lund // Mater. Today Energy. 2020. V.15. Art.100373. DOI : 10.1016/j.mtener.2019.100373.
7. *Singh, B.* Low temperature solid oxide electrolytes (LT-SOE) : a review / B. Singh, S. Ghosh, S. Aich, B. Roy // J. Power Sources. 2017. V.339. P.103—135. DOI : 10.1016/j.jpowsour.2016.11.019.
8. *Paier, J.* Oxygen defects and surface chemistry of ceria : quantum chemical studies compared to experiment / J. Paier, C. Penschke, J. Sauer // Chem. Rev. 2013. V.113. P.3949—3985.
9. *Bamwenda, G.R.* Cerium dioxide as a photocatalyst for water decomposition to O_2 in the presence of Ce^{4+}_{aq} and Fe^{3+}_{aq} species / G.R. Bamwenda, H. Arakawa // J. Molecular Catal. A : Chemical. 2000. V.161. P.105—113.
10. *Gao, H.* Cerium oxide coating of titanium dioxide pigment to decrease its photocatalytic activity / Gao H., Qiao B., Wang T.-J., Wang D., Jin Y. // Industr. Eng. Chem. Res. 2014. V.53. P.189—197.
11. *Torrente-Murciano, L.* Shape-dependency activity of nanostructured CeO_2 in the total oxidation of polycyclic aromatic hydrocarbons / L. Torrente-Murciano, A. Gilbank, B. Puertolas, T. Garcia, B. Solsona, D. Chadwick // Appl. Catalys. B : Environ. 2013. V.132, 133. P.116—122.
12. *Vorokhta, M.* HAXPES study of CeO_x thin film-silicon oxide interface / M. Vorokhta, I. Matolinová, M. Dubau, S. Haviar, I. Khalakhan, K. Ševčiková, T. Mori, H. Yoshikawa, V. Matolin // Appl. Surf. Sci. 2014. V.303. P.46—53.
13 *Hierso, J.* Nanostructured ceria based thin films (≤1μm) as cathode/electrolyte interfaces / J. Hierso, P. Boy, K. Valle, J. Vulliet, F. Blein, C. Laberty-Robert, C. Sanchez // J. Solid State Chem. 2013. V.197. P.113—119.
14. *Shen, D.* Effect of cerium and lanthanum additives on plasma electrolytic oxidation of AZ31 magnesium alloy / Shen D., Ma H., Guo C., Cai J., Li G., He D., Yang Q. // J. Rare Earths. 2013. V.31. P.1208—1213.
15. *Cao, X.Q.* Ceramic materials for thermal barrier coatings / X.Q. Cao, R. Vassen, D. Stoever // J. Eur. Ceram. Soc. 2004. V.24. P.1—10.
16. *Lin, K.-S.* Synthesis, characterization, and application of 1-D cerium oxide nanomaterials : A review / K.-S. Lin, S. Chowdhury // Intern. J. Mol. Sci. 2010. V.11. P.3226—3251.
17. *Patsalas, P.* Optical performance of nanocrystalline transparent ceria films / P. Patsalas, S. Logothetidis, C. Metaxa // Appl. Phys. Lett. 2002. V.81. P.466—468.
18. *Azimi, G.* Hydrophobicity of rareearth oxide ceramics / G. Azimi, R. Dhiman, H.M. Kwon, A.T. Paxson, K.K. Varanasi // Nat. Mater. 2013. V.12. P.315—320.
19. *Fahrenholtz, W.G.* Characterization of cerium-based conversion coatings for corrosion protection of aluminum alloys / W.G. Fahrenholtz, M.J. O'Keefe, H. Zhou, J.T. Grant // Surf. Coat. Technol. 2002. V.155. P.208—213.
20. *Auffan, M.* CeO_2 nanoparticles induce DNA damage towards human dermal fibroblasts in vitro / M. Auffan, J. Rose, T. Orsiere, M. De Meo, A. Thill, O. Zeyons, O. Proux, A. Masion, P. Chaurand, O. Spalla, A. Botta, M.R. Wiesner, J.-Y. Bottero // Nanotoxicology. 2009. №3. P.161—169.
21. *Filippova, A.D.* Low-temperature inactivation of enzyme-like activity of nanocrystalline CeO_2 sols / A.D. Filippova, M.M. Sozarukova, A.E. Baranchikov, A.A. Egorova, K.A. Cherednichenko, V.K. Ivanov // Rus. J. Inorganic Chem. 2022. V.67. №12. P.1948—1955. DOI : 10.1134/S0036023622601581.
22. *Popov, A.L.* Synthesis and biocompatibility study of ceria-mildronate nanocomposite in vitro / A.L. Popov, D.D. Kolmanovich, N.R. Popova, S.S. Sorokina, O.S. Ivanova, N.N. Chukavin, A.B. Shcherbakov, T.O. Kozlova, S.A. Kalashnikova, V.K. Ivanov // Nanosystems : Physics, Chemistry, Mathematics. 2022. V.13(1). P.96—103. DOI : 10.17586/2220-8054-2022-13-1-96-103.
23. *Petrova, V.A.* Bacterial cellulose composites with polysaccharides filled with nanosized cerium oxide : characterization and cytocompatibility assessment / V.A. Petrova, I.V. Gofman, A.S. Golovkin, A.I. Mishanin, N.V. Dubashynskaya, A.K. Khripunov, E.M. Ivan'kova, E.N. Vlasova, A.L. Nikolaeva, A.E. Baranchikov, Y.A. Skorik, A.V. Yakimansky, V.K. Ivanov // Polymers. 2022. V.14(22). Art.5001. DOI : 10.3390/polym14225001.
24. *Huang, S.F.* Cerium caused life span shortening and oxidative stress resistance in Drosophila melanogaster / Huang S.F., Li Z.Y., Wang X.Q., Wang Q.X., Hu F.F. // Ecotoxicol. Environ. Saf. 2010. V.73. №1. P.89—93.
25. *Щербаков, А.Б.* Нанокристаллический диоксид церия — перспективный материал для биомедицинского применения / А.Б. Щербаков, В.К. Иванов, Н.М. Жолобак, О.С. Иванова, Е.Ю. Крысанов, А.Е. Баранчиков, Н.Я. Спивак, Ю.Д. Третьяков // Биофизика. 2011. Т.56. №6. С.995—1015.
26. *Karakoti, A.S.* Preparation and characterization challenges to understanding environmental and biological impacts of ceria nanoparticles / A.S. Karakoti, P. Munusamy, K. Hostetler, V. Kodali, S. Kuchibhatla, G. Orr, J.G. Pounds, J.G. Teeguarden, B.D. Thrall, D.R. Baer // Eur. Appl. Surf. Intern. Analysis. 2011. V.44. №8. P.882—889.
27. *Zhang, Y.W.* Facile alcohothermal synthesis, size-dependent ultraviolet absorption and enhanced CO conversion activity of ceria nanocrystals / Zhang Y.W., Si R., Liao C.S., Yan C.H., Xiao C.X., Kou Y. // J. Phys. Chem. B. 2003. V.107. P.10159—10167.
28. *Pierscionek, B.K.* Nanoceria have no genotoxic effect on human lens epithelial cells / B.K. Pierscionek, Li Y., A.A. Yasseen, L.M. Colhoun, R.A. Schachar, Chen W. // Nanotechnology. 2010. V.21. №3. Art.035102.
29. *Barreca, D.* Nucleation and growth of nanophasic CeO_2 thin films by plasma-enhanced CVD / D. Barreca, A. Gasparotto, E. Tondello, C. Sada, S. Polizzi, A. Benedetti // Chem. Vap. Depos. 2003. №9. P.199—206.
30. *Balakrishnan, G.* A study of microstructural and optical properties of nanocrystalline ceria thinfilms prepared by pulsed laser deposition / G. Balakrishnan, S.T. Sundari, P. Kuppusami, P.C. Mohan, M.P. Srinivasan, E. Mohandas, V. Ganesan, D. Sastikumar // ThinSolid Films. 2011. V.519. P.2520–2526.

31. *Steenberge, S.V.* Influence of oxygen flow and film thickness on the texture and microstructure of sputtered ceria thin films / S.V. Steenberge, W.P. Leroy, D. Depla // ThinSolid Films. 2014. V.553. P.2—6.
32. *Shi, Z.* Effect of bias voltage on the properties of CeO_{2-x} coatings prepared by magnetron sputtering / Shi Z., Shum P., Zhou Z., Li L. K.-Y. // Surf. Coat. Technol. 2017. V.326 B. P.411—416. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.11.104.
33. *Shi, Z.* Effect of oxygen flow ratio on the wetting behavior, microstructure and mechanical properties of CeO_{2-x} coatings prepared by magnetron sputtering / Shi Z., Shum P., Zhou Z., Li L. K.-Y. // Surf. Coat. Technol. 2017. V.20. P.333—338. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.12.055.
34. *Khalakhan, I.* Au-CeO_2 nanoporous films/carbon nanotubes composites prepared by magnetron sputtering / I. Khalakhan, M. Vorokhta, M. Chundak, V. Matolin // Appl. Surf. Sci. 2013. V.267. P.150—153. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.08.106.
35. *Yamamoto, S.* Orientational control of CeO_2 films on sapphire substrates grown by magnetron sputtering / S. Yamamoto, M. Sugimoto, H. Koshikawa, T. Hakoda, T. Yamaki // J. Crystal Growth. 2017. V.468. P.262—267. https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2016.12.038.
36. *Kim, L.* Effects of deposition parameters on the crystallinity of CeO_2 thin films deposited on Si(100) substrates by r.f.-magnetron sputtering / Kim L., Kim J., Jung D., Park C.-Y., Yang C.-W., Roh Y. // ThinSolid Films. 2000. V.360. №1—2. P.154—158. https://doi.org/10.1016/S0040-6090(99)01087-1.
37. *Kabir, M.S.* Structure and properties of hydrophobic CeO_{2-x} coatings synthesized by reactive magnetron sputtering for biomedical applications / M.S. Kabir, P. Munroe, V. Gonçales, Z. Zhou, Z. Xie // Surf. Coat. Technol. 2018. V.349. P.667—676. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.06.031.
38. *Mickan, M.* Optimized magnetron sputtering process for the deposition of gadolinia doped ceria layers with controlled structural properties / M. Mickan, P. Coddet, J. Vulliet, A. Caillard, T. Sauvage, A.-L. Thomann // Surf. Coat. Technol. 2020. V.398. Art.126095. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126095.
39. *Park, I.* Grain growth and mechanical properties of CeO_{2-x} films deposited on Si(100) substrates by pulsed dc magnetron sputtering / Park I., Lin J., J.J. Moore, M. Khafizov, D. Hurley, Manuel M.V., T. Allen // Surf. Coat. Technol. 2013. V.217. P.34—38. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.11.068.
40. *Кузьмичёв, А.И.* Магнетронные распылительные системы : в 2 кн. Кн.1. Введение в физику и технику магнетронного распыления / А.И. Кузьмичёв. — К. : Аверс, 2008. 244 с.
41. *Nasakina, E.O.* Study of Co-deposition of tantalum and titanium during the formation of layered composite materials by magnetron sputtering / E.O. Nasakina, M.A. Sudarchikova, K.Y. Demin, A.B. Mikhailova, K.V. Sergienko, S.V. Konushkin, M.A. Kaplan, A.S. Baikin, M.A. Sevostyanov, A.G. Kolmakov // Coatings. 2023. V.13. P.114. https://doi.org/10.3390/coatings13010114.