

УДК 669.2292'5 + 669.735 : 539.216.2

<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-1-66-74>

Научная статья

Research article



Сформированные наночастицами сплавы V–Cd: получение, фазовый состав и структура

В.Н. Володин, Ю.Ж. Тулеушев, А.К. Калиева, Е.А. Жаканбаев, А.К. Мамырбаев

Институт ядерной физики Министерства энергетики Респ. Казахстан

050032, Респ. Казахстан, г. Алматы, ул. Ибрагимова, 1

✉ Валерий Николаевич Володин (volodinv_n@mail.ru)

Аннотация: Приведены результаты исследований распыления и осаждения ультрадисперсных частиц ванадия и кадмия на необогреваемые и перемещаемые относительно потоков плазмы подложки. Были получены покрытия в интервале концентраций кадмия от 9,6 до 88,6 ат.%. Критическим размером частиц ванадия, способных к образованию сплавов с кадмием, определена величина 0,6 нм. Концентрационной границей существования твердых растворов кадмия в ванадии является содержание кадмия ~37 ат.%, при большей его доли пленочное покрытие представлено смесью фаз кадмия и твердого раствора кадмия в ванадии. Зависимость параметра решетки α -ванадия от содержания кадмия в нем соответствует следующему выражению: a [нм] = $8 \cdot 10^{-4} C_{Cd} + 0,3707$, где C_{Cd} – концентрация кадмия, ат.%. На поверхности образца в области твердых растворов (31,6 ат.% Cd) обнаружено наличие нитевидных кристаллов кадмия, причиной появления которых является решеточное давление матричного металла. Отжиг богатых по содержанию кадмия пленок (69,5 ат.%) в вакууме сопровождается растрескиванием покрытия и образованием пор. Последнее может быть использовано как метод получения пористого ванадия.

Ключевые слова: ванадий, кадмий, наночастицы, сплав, твердый раствор, параметр решетки, покрытие, нитевидные кристаллы

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Республики Казахстан (грант BR10965191).

Для цитирования: Володин В.Н., Тулеушев Ю.Ж., Калиева А.К., Жаканбаев Е.А., Мамырбаев А.К. Сформированные наночастицами сплавы V–Cd: получение, фазовый состав и структура. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2023; 29 (1): 66–74. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-1-66-74>

V–Cd nanoparticle-formed alloys: fabrication, phase composition and structure

V.N. Volodin, Yu.Zh. Tuleushev, A.K. Kaliyeva, E.A. Zhakanbayev, A.K. Mamyrbayev

Institute of Nuclear Physics, Ministry of Energy of Republic of Kazakhstan

1 Ibragimov str., Almaty, 050032, Republic of Kazakhstan

✉ Valerii N. Volodin (volodinv_n@mail.ru)

Abstract: The results of the study of targeted sputtering and deposition of ultrafine vanadium and cadmium particles on substrates that are not heated and shifted with respect to the substrate plasma currents are revealed. As a result of the conducted studies, coatings were obtained in the range with a concentration of cadmium from 9.6 to 88.6 at.%. The critical size of vanadium particles capable of forming alloys with cadmium is 0.6 nm. The concentration limit for the presence of solid solutions of cadmium in vanadium is the cadmium content of ~37 at.%, at a higher cadmium content the film coating is represented by a mixture of cadmium phases and a solid solution of cadmium in vanadium. The dependence of the lattice parameter of α -vanadium on the content of cadmium in it corresponds to the expression: a [nm] = $8 \cdot 10^{-4} C_{Cd} + 0.3707$, where C_{Cd} is the concentration of cadmium, at.%. On the surface of the sample in the region of solid solutions (31.6 at.% Cd), the presence of threadlike crystals of cadmium was found, the reason for the appearance of which is the lattice pressure of

the matrix metal. Annealing of films rich in cadmium (69.5 at.%) in vacuum is accompanied by cracking of the coating and the formation of pores. The latter can be used as a method for obtaining porous vanadium.

Keywords: vanadium, cadmium, nanoparticles, alloy, solid solution, lattice parameter, coating, threadlike crystals

Funding: This work was supported financially by the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan (grant BR10965191).

For citation: Volodin V.N., Tuleushev Yu.Zh., Kaliyeva A.K., Zhakanbayev E.A., Mamyrbayev A.K. V–Cd nanoparticle-formed alloys: fabrication, phase composition and structure. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2023; 29 (1): 66–74. (In Russ.).

<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-1-66-74>

Введение

К настоящему времени существует проблема получения сплавов металлов, имеющих весьма большие различия в физических свойствах — таких, как температура плавления, давление пара, плотность, тип кристаллической решетки и т.п. В то же время при создании подобных сплавов предполагаются новые их свойства и технологии получения потенциальных материалов с необычными характеристиками. В нашем случае выбор сплава обусловлен тем что отгонка легколетучего кадмия из сплавов системы «ванадий—кадмий» позволит получить пористый ванадий, который сможет применяться в качестве катализатора, специального фильтра и в других областях техники.

Одним из способов нивелирования различий свойств металлов, в первую очередь температур плавления, при получении твердых растворов (сплавов) является использование размерного фактора. Значительное — от нескольких десятков до сотен градусов — понижение температуры плавления дисперсных частиц различных металлов с уменьшением размеров капель вызвало всплеск интереса исследователей к этой области материаловедения. К настоящему времени выполнено большое количество работ, посвященных влиянию размера частиц на температуру плавления [1–8], термодинамику малых образований [9–13] и структуру материала, получению сплавов при «комнатной температуре», синтезу интерметаллических соединений [14–16] и др. Подобные исследования повлекли введение в научный обиход понятия «термофлуктуационное плавление». Последнее подразумевает пребывание весьма малой частицы в квазижидком состоянии до некоторого критического размера, превышение которого обуславливает ее кристаллизацию.

Автор работы [13] при рассмотрении термодинамики малых систем отметил несколько ключевых моментов, в частности: для достаточно малых систем представления о фазовом состоянии и фа-

зовых переходах теряют смысл; для очень малых и изолированных систем становится невозможным разумное определение понятия температуры; температуры плавления и кипения жидких наноразмерных капель вещества всегда оказываются ниже соответствующих значений в объемной фазе того же материала и др.

Сведения о существовании сплавов ванадия и кадмия или интерметаллических соединений в литературе отсутствуют. Температуры плавления [17] ванадия — 1910 °С, кадмия — 321 °С; температуры кипения [18] (при которых давление пара равно атмосферному давлению) ванадия — 3392 °С, кадмия — 766 °С.

Инструментальное определение размера и температуры плавления малых частиц весьма сложно, однако образование сплава — твердого раствора двух металлов — является подтверждением пребывания ультрадисперсных частиц, способных к коалесценции, в квазижидком состоянии при низкой температуре. В этой связи нами выполнено исследование по получению двойных сплавов ванадия с кадмием осаждением распыленных металлов с целью определения критических размеров нанокластеров металлов, концентрационных границ существования твердых растворов Cd–V, изучения фазового состава и структуры в пленочных покрытиях.

Материалы и методика эксперимента

Одним из способов формирования потоков ультрадисперсных частиц нанометровых (< 100 нм) размеров является распыление металлов в плазме низкого давления. Исследования выполнены с использованием ионно-плазменной установки, на стенках вакуумной камеры которой оппозитно размещены планарные магнетроны постоянного тока с водоохлаждаемыми мишенями. Конструк-

ция установки и методика напыления образцов подробно изложены ранее [15].

Температура подложек во время формирования образцов не превышала 100 °С. Соотношение концентраций металлов в образцах сплавов изменяли скоростью распыления мишеней магнетронных распылителей. Соотношение осажденных компонентов контролировали весовым способом (по количеству распыленного и осажденного металла во время формирования покрытия) и, параллельно, методом резерфордского обратного рассеяния протонов на тандемном ускорителе УКП-2-1 Института ядерной физики (г. Алматы).

В экспериментах применяли металлы с содержанием основного элемента, мас. %: ванадия — 99,6; кадмия — 99,99. Мишени выполнены из каждого из металлов в виде дисков диаметром 40 мм и толщиной 4 мм.

Приготовление образцов включало последовательные операции распыления мишеней из ванадия и кадмия и осаждения распыленных частиц на перемещающиеся относительно потоков плазмы необогреваемые подложки в виде островковых пленок — нанометровых субслоев — до предполагаемой суммарной толщины покрытия. Толщину субслоев рассчитывали делением суммарной толщины покрытия на количество проходов подложки относительно потоков металлосодержащей плазмы.

Использование толщины субслоя в качестве размерного фактора обусловлено тем, что изменение температуры плавления пленок с уменьшением их толщины аналогично таковому для малых частиц [13] вследствие того, что формирование их ведется по «островковому» принципу.

Определение критического размера частиц металлов осуществляли уменьшением толщины субслоев попеременным включением распылителей ниобия и второго металла в результате каждого пересечения перемещающейся подложкой потока металлосодержащей плазмы. Причем потоки с разноименными частицами металлов были разнесены на 180° друг относительно друга, что исключало образование растворов при касании или пересечении потоков. Кроме того, время перемещения подложки от осевой линии одного магнетронного распылителя до второго составляло 3 с, что было достаточно для кристаллизации весьма малых частиц в предположении существования этого процесса. Критическим размером частиц металлов считали толщину субслоев, при которой произошло появление твердого раствора в покрытии.

Границей существования сплавов считали концентрацию элементов, при которой наблюдалось возникновение других, кроме твердого раствора, фаз.

Для получения покрытий применялись подложки из поликора (α -Al₂O₃) и монокристаллического кремния. Рентгеноструктурные исследования системы «ванадий—кадмий» выполнены на дифрактометре «D8 Advance» (Bruker, Германия) с CuK α -излучением ($\lambda = 0,154051$ нм) и графитовыми монохроматорами. Значение параметра решетки вычислено как среднее при использовании всех дифракционных линий от данной фазы.

Высокотемпературные отжиги проведены в вакуумной высокотемпературной печи, изготовленной на базе установки УРВТ-2500.

Результаты и их обсуждение

Результаты определения критических размеров субслоев ванадия и кадмия путем поочередного нанесения короткопериодных (с малым числом периодов решетки) слоев (КПС) и уменьшения толщины слоя каждого из металлов для системы с концентрацией ~ 25 ат. % Cd приведены в табл. 1.

В результате дифрактометрических исследований полученных образцов установлено (см. табл. 1), что при толщине КПС ванадия и кадмия 0,6 и 0,3 нм соответственно в покрытии данного состава получен твердый раствор кадмия в ванадии с объемно-центрированной кубической (ОЦК) структурой и параметром решетки $a = 0,3931 \pm 0,0009$ нм. То есть критическим размером наночастиц ванадия, способных к коалесценции с кадмием, является величина 0,6 нм. Критический размер частиц кадмия ожидаемо может быть скорректирован в сторону больших значений, так как увеличение размеров его КПС при сохранении критических размеров частиц ванадия, при существующем способе изготовления покрытия данного состава, выводит систему вне пределов области существования твердых растворов вследствие получения сплавов с большей концентрацией легирующего элемента. Так, например, критический размер наночастиц кадмия при формировании нами сплавов с тугоплавкими металлами ниобием [15] и танталом [19] соответствует значениям 3,2 и 2,1 нм.

С целью определения концентрационных границ существования твердых растворов в системе V–Cd с учетом размерного фактора сформированы 11 образцов покрытий с концентрацией кадмия

Таблица 1. Толщина короткопериодных слоев металлов и параметры решетки обнаруженных фаз в пленках ванадия, содержащих ~25 ат.% Cd

Table 1. Thickness of short-period metal layers and lattice parameters of detected phases in vanadium films containing ~25 at.% Cd

Толщина слоев, нм		Параметры решеток фаз, нм		
V	Cd	V	Cd	
		<i>a</i>	<i>a</i>	<i>c</i>
16,0	8,0	0,3491 ± 0,0018	0,2981 ± 0,0002	0,5620 ± 0,0003
12,1	6,0	0,3815 ± 0,0012	0,2980 ± 0,0003	0,5621 ± 0,0002
9,3	4,8	0,3868 ± 0,0008	0,2980 ± 0,0002	0,5622 ± 0,0003
6,2	3,0	0,3925 ± 0,0007	0,2982 ± 0,0002	0,5620 ± 0,0003
3,4	1,7	Аморфный		
0,6	0,3	Твердый раствор кадмия в ванадии, <i>a</i> = 0,3931 ± 0,0009 нм		

от 9,6 до 88,6 ат.%. Состав покрытий и обнаруженные в них фазы приведены в табл. 2.

На рис. 1 представлены некоторые дифрактограммы покрытий системы V–Cd с различной концентрацией кадмия.

В образце с содержанием кадмия 88,6 ат.% (спектр 1 на рис. 1) обнаружены фазы кадмия и аморфного ванадия. В интервале концентраций 42,0–80,2 ат.% Cd (спектр 2) фаза кадмия сосуществует с твердым раствором кадмия в ванадии с ОЦК-структурой. Кадмий как отдельная фаза не наблюдается в покрытиях с <31,6 ат.% Cd

(спектр 3). Причем в этом случае твердый раствор кадмия в ванадии имеет преимущественную ориентацию (111). При концентрациях <14,7 ат.% (спектр 4) покрытия представлены твердыми рас-

Таблица 2. Состав покрытий и обнаруженные в них фазы

Table 2. Coatings composition and phases detected

Состав покрытия, ат.%		Обнаруженные фазы
V	Cd	
11,4	88,6	Cd + V аморфный
19,8	80,2	Cd + твердый раствор кадмия в ванадии
30,5	69,5	Cd + твердый раствор кадмия в ванадии
35,0	65,0	Cd + твердый раствор кадмия в ванадии
43,3	56,7	Cd + твердый раствор кадмия в ванадии
47,7	52,3	Cd + твердый раствор кадмия в ванадии
57,0	43,0	Cd + твердый раствор кадмия в ванадии
68,4	31,6	Твердый раствор кадмия в ванадии (текстура (111))
73,5	26,5	Твердый раствор кадмия в ванадии
85,3	14,7	Твердый раствор кадмия в ванадии
90,4	9,6	Твердый раствор кадмия в ванадии

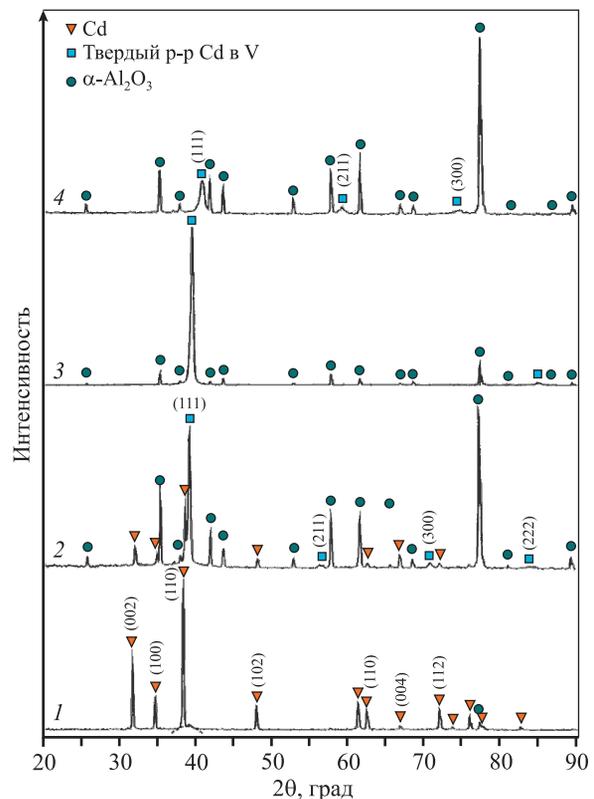


Рис. 1. Дифрактограммы покрытий системы V–Cd с различным содержанием кадмия

Cd, ат.%. 1 – 88,6; 2 – 43,0; 3 – 31,6; 4 – 14,7

Fig. 1. V–Cd system coatings diffractograms with different cadmium contents

Cd, at.%. 1 – 88.6; 2 – 43.0; 3 – 31.6; 4 – 14.7

творами кадмия в ванадии с изменяющимся в сторону увеличения параметром решетки твердого раствора вследствие значительно большего радиуса атомов кадмия (0,1727 нм) по отношению к такому у ванадия (0,1489 нм) [20]. Изменение параметра решетки твердого раствора кадмия в ванадии, а также раствора, сосуществующего с кадмием, приведено на рис. 2.

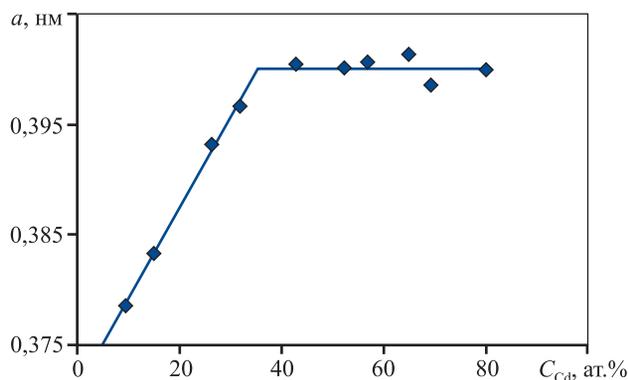


Рис. 2. Зависимость параметра решетки твердого раствора кадмия в ванадии от содержания кадмия в покрытии

Fig. 2. Cadmium–vanadium solid solution lattice parameter dependence on the cadmium content in the coating

Из данных рис. 2 видно, что до концентрации ~37 ат.% Cd параметр решетки α-ванадия изменяется линейно с повышением содержания кадмия в растворе; для больших, чем указанное, значений доли Cd насыщенный твердый раствор со средним параметром $a = 0,4001$ нм выделяется в отдельную фазу (сосуществующую с кадмием). То есть концентрационная граница существования твердых растворов кадмия в ванадии соответствует ~37 ат.% Cd. Зависимость параметра решетки α-ванадия до его насыщения от содержания кадмия в нем соответствует следующему уравнению: a [нм] = $8 \cdot 10^{-4} C_{Cd} + 0,3707$, где C_{Cd} — концентрация кадмия, ат.%.

РЭМ-исследованиями исходного образца с концентрацией кадмия 31,6 ат.% (рис. 3) обнаружено на поверхности покрытия, помимо образований 1–2 мкм, появление нитевидных кристаллов длиной до 30 мкм и толщиной до 2 мкм различной формы, а также кристаллов, напоминающих прорастающие растения.

Механизм формирования таких образований на поверхности образцов схож, по-видимому, с явлением образования аналогичных кристаллов олова в виде вискерсов и выступов на поверхности Lu_4Sn_5 при хранении на воздухе в течение нескольких дней, где

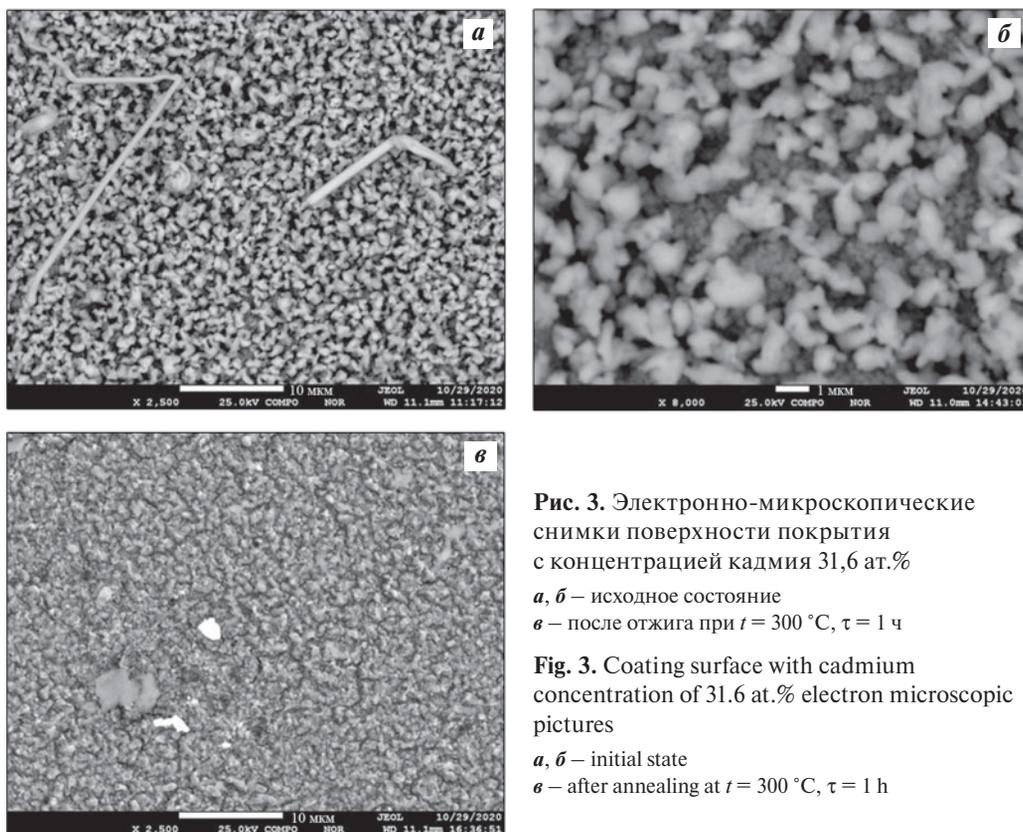


Рис. 3. Электронно-микроскопические снимки поверхности покрытия с концентрацией кадмия 31,6 ат.%

a, б – исходное состояние
в – после отжига при $t = 300$ °C, $\tau = 1$ ч

Fig. 3. Coating surface with cadmium concentration of 31.6 at.% electron microscopic pictures

a, б – initial state
в – after annealing at $t = 300$ °C, $\tau = 1$ h

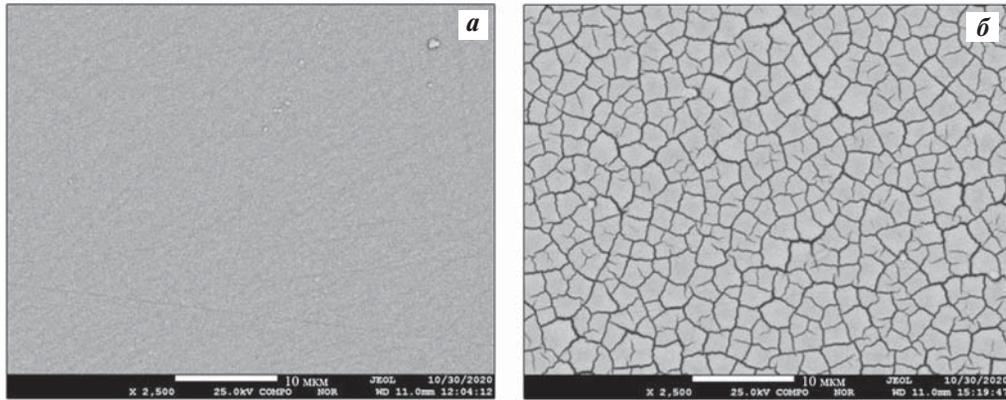


Рис. 4. Электронно-микроскопические снимки поверхности покрытия с концентрацией кадмия 69,5 ат.%. *a* – исходное состояние; *б* – после отжига при $t = 300\text{ °C}$, $\tau = 1\text{ ч}$

Fig. 4. Coating surface with 69.5 at.% cadmium concentration electron-microscopic pictures

a – initial state; *б* – after annealing at $t = 300\text{ °C}$, $\tau = 1\text{ h}$

иницирующей силой роста нитевидных кристаллов являются сжимающие напряжения матричного соединения [21]. Поверхность отожженного при температуре 300 °C в вакууме образца, потерявшего значительную часть (по предварительным данным, 30–40 мас.% [22]) кадмия испарением, представлена оплавленными зернами неправильной формы, различающимися по размеру.

Аналогичное исследование образца с содержанием кадмия 69,5 ат.%, характеризующегося сосуществующими фазами кадмия и твердого раствора кадмия в ванадии, показало другую топографию поверхности (рис. 4). Исходный образец не имеет выраженных зерновых образований. После отжига поверхность представлена образованиями в виде «такыра» с пористой,

вследствие испарения кадмия, структурой внутри пленки.

При дифрактометрическом исследовании отожженного при температуре 400 °C в течение 1 ч образца покрытия с содержанием кадмия 9,6 ат.% (рис. 5) наблюдаются рефлексы фазы, которую можно отнести к кубической сингонии. При этом рефлекс (111) этой фазы точно совпадает с рефлексом (104) ($d_{hkl} = 0,2552\text{ нм}$), а рефлекс (220) — с рефлексом (211) ($d_{hkl} = 0,1546\text{ нм}$) поликора. Предполагаемый параметр решетки этой кубической фазы $a = 0,4393 \pm 0,0008\text{ нм}$ дает основание предполагать, что соединение является сложным оксидом кадмия–ванадия с формулой $V_xHf_{1-x}O$, так как известен оксид кадмия CdO (карточка ICPSDS № 1011051) с параметром решетки $a = 0,4730\text{ нм}$ [23]. Ниже приведены измеренные значения d_{hkl} предполагаемой фазы и соответствующие индексы Миллера:

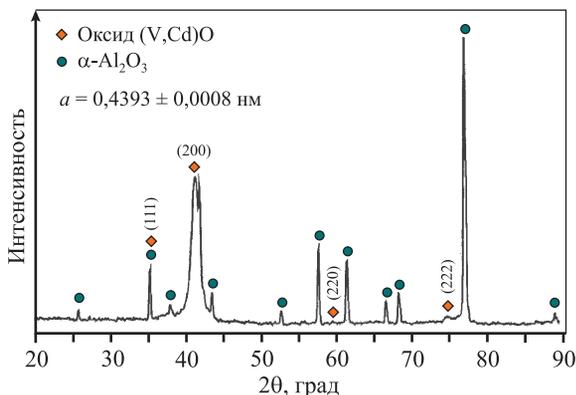


Рис. 5. Дифрактограмма образца покрытия с содержанием 9,6 ат. % Cd после отжига ($t = 400\text{ °C}$, $\tau = 1\text{ ч}$)

Fig. 5. Coating sample containing 9.6 Cd at.% diffractogram after annealing ($t = 400\text{ °C}$, $\tau = 1\text{ h}$)

d_{hkl} , нм.....	0,2552	0,2195	0,1546	0,1269
hkl	(111)	(200)	(220)	(222)

Образование оксида после извлечения образца из вакуумного объема свидетельствует, по нашему мнению, о наличии развитой структуры в глубине пленки. Суждение о наличии сквозных пор в этом случае не представляется возможным, однако вероятность их присутствия весьма высока. Это требует, наряду с изучением степени испарения кадмия из пленок подобного состава и из твердого раствора кадмия в ванадии, дополнительных исследований.

Вместе с тем, получение покрытий с высоким содержанием и последующим испарением кадмия

из его смесей с твердым раствором кадмия в ванадии может быть использовано для получения материала с весьма развитой поверхностью.

Заключение

В результате выполненного исследования подтверждена возможность пребывания ультрадисперсных, способных к образованию сплавов и соединений частиц ванадия и кадмия в квазижидком состоянии. Формирование покрытий ультрадисперсными частицами металлов позволяет получить сплавы (твердые растворы) при температуре менее 100 °С. Критическим размером частиц ванадия, способных к коалесценции с кадмием, определена величина 0,6 нм. Для кадмия получено заниженное значение критического размера образований по сравнению с подтвержденными данными ранних исследований — 0,3 нм.

Концентрационной границей существования твердых растворов кадмия в ванадии является содержание ~37 ат.% Cd, при этом параметр объемно-центрированной кубической решетки α -ванадия линейно увеличивается из-за большего атомного радиуса кадмия по отношению к ванадию. При большем (до 80,2 ат.%) содержании кадмия пленочное покрытие представлено смесью фаз кадмия и твердого раствора кадмия в ванадии.

Электронно-микроскопическими исследованиями на поверхности образца в области существования твердых растворов (31,6 ат.% Cd) обнаружено наличие нитевидных кристаллов и образований кадмия, причиной появления которых, по нашему мнению и на основании результатов опубликованных исследований других авторов, стало решеточное давление матричного металла.

Отжиг образцов в вакууме сопровождается диффузией кадмия к поверхности раздела фаз и испарением его, что снижает его концентрацию в покрытии. При отжиге богатых по содержанию кадмия пленок в области существования фаз кадмия и твердого раствора (69,5 ат.% Cd) наблюдается растрескивание покрытия и образование пор — это, после дополнительных исследований, может быть использовано как метод получения пористого ванадия.

Список литературы/References

1. Peppiatt S.J. The melting of particles. II. Bismuth. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*. 1975; A345 (1642): 401–412. <https://doi.org/10.1098/rspa.1975.0145>
2. Berty J., David M.J., Lafourcade L. Etude de la surfusion de films mines de bismuth par diffracyon des electrons. *Thin Solid Films*. 1977; 46 (2): 177–185. [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(77\)90060-8](https://doi.org/10.1016/0040-6090(77)90060-8)
3. Жданов Г.С. Температурный гистерезис фазового перехода и механизм кристаллизации тонких металлических пленок. *Физика твердого тела*. 1977; 19 (1): 299–301. Zhdanov G.S. Temperature hysteresis of the phase transition and the crystallization mechanism of thin metal films. *Fizika tverdogo tela*. 1977; 19 (1): 299–301. (In Russ.)
4. Buffat Ph., Borel J-P. Size effect on the melting temperature of gold particles. *Physical Review A*. 1976; 13 (6): 2287–2298. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.13.2287>
5. Perepezko J.H., Rasmussen D.H. Solidification of highly supercooled liquid metal and alloys. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 1993; 156–158: 463–472. [https://doi.org/10.1016/0022-3093\(93\)90002-F](https://doi.org/10.1016/0022-3093(93)90002-F)
6. Roduner E. Size matters: why nanomaterials are different. *Chemical Society Reviews*. 2006; 35: 583–592
7. Zou C., Gao Y., Yang B., Zhai Q. Size dependent melting properties of Sn nanoparticles by chemical reduction synthesis. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2010; 20 (2): 248–253. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(09\)60130-8](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(09)60130-8)
8. Jiang H., Moon K., Dong H. Size dependent melting properties of tin nanoparticles. *Chemical Physics Letters*. 2006; 429 (4): 492–496. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2006.08.027>
9. Stowell M.J. The solid-liquid interfacial free energy of lead from supercooling data. *Philosophical Magazine: A Journal of Theoretical, Experimental and Applied Physics*. 1970; 22 (176): 1–6. <https://doi.org/10.1080/14786437008228146>
10. Qingshan F., Yongqiang X., Zixiang C. Size — and shape — dependent surface thermodynamic properties of nanocrystals. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 2018; 116: 79–85. <https://doi.org/10.1016/j.jpccs.2018.01.018>
11. Mu J., Zhu Z.W., Zhang H.F. Size dependent melting behaviors of nanocrystalline in particles embedded in amorphous matrix. *Journal of Applied Physics*. 2012; 111 (4): 043515 (1–4). <https://doi.org/10.1063/1.3686624>
12. Luo W., Su K., Li K., Li Q. Connection between nanostructured materials' size dependent melting and thermodynamic properties of bulk materials. *Solid State Communications*. 2011; 151 (3): 229–233. <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2010.11.025>
13. Родунер Э. Размерные эффекты в наноматериалах. М.: Техносфера, 2010.

14. Tuleushev Yu.Zh., Volodin V.N., Zhakanbaev E.A. New Ta₃Be phase in the film coatings of tantalum-beryllium alloys. *Physics of Metals and Metallography*. 2019. 120 (4): 361–365.
<https://doi.org/10.1134/S0031918X19040148>
15. Volodin V.N., Tuleushev Yu.Zh., Trebukhov S.A., Nitsenko A.V., Burabaeva N.V. Fabrication of binary niobium alloys with low-melting metals by the deposition of nanoparticles. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2019; 60 (6): 639–645.
<https://doi.org/10.3103/S106782121906021X>
16. Volodin V.N., Tuleushev Yu.Zh., Zhakanbaev E.A., Trebukhov S.A., Burabaeva N.V., Nitsenko A.V. Synthesis of intermetallic phases in the Nb–Cd and Mo–Cd systems by ion-plasma sputtering and atomic layer deposition of metals in vacuum. *Inorganic Materials*. 2020; 56 (1): 28–34.
<https://doi.org/10.1134/S0020168520010185>
17. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник. Т. 3. Под ред. Н.П. Лякишева. М.: Машиностроение, 2001.
18. Малышев В.П., Турдукожаева А.М., Оспанов Е.А., Саркенов Б. Испаряемость и кипение простых веществ. М.: Научный мир, 2010.
19. Володин В.Н., Ниценко А.В., Требухов С.А., Бурабаева Н.М., Тулеушев Ю.Ж. Получение двойных сплавов кадмия с тугоплавкими металлами осаждением наночастиц. В сборнике докладов XI международно-го конгресса «Цветные металлы и минералы — 2019» (Красноярск, 16–20 сент. 2019 г.). Красноярск: Научно-инновационный центр, 2019. С. 1019–1028.
20. Физическое металловедение. Под ред. Р.У. Кана, П. Хаазена. М.: Metallurgia, 1987.
21. Chuang T.H., Lin H.J., Chi C.C. Rapid growth of tin whiskers on the surface of Sn–6.6Lu alloy. *Science: Materials*. 2007; 56 (1): 45–48.
22. Володин В.Н., Тулеушев Ю.Ж., Кенжалиев Б.К., Требухов С.А. Термическая деградация твердых сплавов системы ниобий–кадмий при низком давлении. *Комплексное использование минерального сырья*. 2020; (1 (312)): 41–47.
Volodin V.N., Tuleushev Yu.Zh., Kenzhaliev B.K., Trebukhov S.A. Thermal degradation of hard alloys of niobium-cadmium system at low pressure. *Kompleksnoe ispol'zovanie mineral'nogo syr'ya*. 2020; (1 (312)): 41–47. (In Russ.).
<https://doi.org/10.31643/2020/6445/05>

Информация об авторах

Валерий Николаевич Володин – д.ф.-м.н., д.т.н., профессор, главный научный сотрудник лаборатории ионно-плазменных технологий Института ядерной физики (ИЯФ) Министерства энергетики Респ. Казахстан.

<https://orcid.org/4701-1670-0043>

E-mail: volodinv_n@mail.ru

Юрий Жианшахович Тулеушев – к.ф.-м.н., профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории ионно-плазменных технологий ИЯФ.

<https://orcid.org/5308-0348-2509>

E-mail: yuriy.tuleushev@mail.ru

Асель Кыдырханкызы Калиева – младший научный сотрудник лаборатории ионно-плазменных технологий ИЯФ.

<https://orcid.org/7710-2140-1000>

E-mail: inbox2110@mail.ru; lab_ipt@mail.ru

Елдар Асхатович Жаканбаев – к.ф.-м.н., заведующий лабораторией ионно-плазменных технологий ИЯФ.

<https://orcid.org/8009-0450-2235>

E-mail: lab_ipt@mail.ru

Арсен Кайратулы Мамырбаев – инженер лаборатории ионно-плазменных технологий ИЯФ.

<https://orcid.org/9702-2227-4561>

E-mail: arsen.mamyrbaev@gmail.com

Information about the authors

Valerii N. Volodin – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Dr. Sci. (Eng.), Prof., Principal Scientist of the Laboratory “Ion-Plasma Technologies”, Institute of Nuclear Physics.

<https://orcid.org/4701-1670-0043>

E-mail: volodinv_n@mail.ru

Yurii Zh. Tuleushev – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Leading Scientist of the Laboratory “Ion-Plasma Technologies”, Institute of Nuclear Physics.

<https://orcid.org/5308-0348-2509>

E-mail: yuriy.tuleushev@mail.ru

Asel' K. Kaliyeva – Junior Research Scientist of the Laboratory “Ion-Plasma Technologies”, Institute of Nuclear Physics.

<https://orcid.org/7710-2140-1000>

E-mail: inbox2110@mail.ru; lab_ipt@mail.ru

Eldar A. Zhakanbayev – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Head of the Laboratory “Ion-Plasma Technologies”, Institute of Nuclear Physics.

<https://orcid.org/8009-0450-2235>

E-mail: lab_ipt@mail.ru

Arsen K. Mamyrbayev – Engineer of the Laboratory “Ion-Plasma Technologies”, Institute of Nuclear Physics.

<https://orcid.org/9702-2227-4561>

E-mail: lab_ipt@mail.ru

Вклад авторов

В.Н. Володин – формирование основной концепции, постановка цели и задачи исследования, написание текста статьи, формулировка выводов.

Ю.Ж. Тулеушев – проведение расчетов, испытаний образцов, подготовка текста статьи.

А.К. Калиева – проведение экспериментов, обработка результатов исследований.

Е.А. Жаканбаев – научное руководство, корректировка текста, корректировка выводов.

А.К. Мамырбаев – проведение расчетов, анализ результатов исследований.

Contribution of the authors

V.N. Volodin – formation of the main concept, goal and objectives of the study, writing the text of the article, formulation of the conclusions.

Yu.Zh. Tuleushev – conducting the calculations, testing the samples, preparing the text of the article.

A.K. Kaliyeva – realization of experiment, processing of the research results.

E.A. Zhakanbayev – scientific guidance, correction of the text and conclusions.

A.K. Mamyrbayev – conducting the calculations, analysis of the research results.

Статья поступила в редакцию 14.04.2022, доработана 23.05.2022, подписана в печать 26.05.2022

The article was submitted 14.04.2022, revised 25.05.2022, accepted for publication 26.05.2022