

УДК 621.793:539.234:539.534.9

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СЛОЕВ НА ПОВЕРХНОСТИ ВЕНТИЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ В ПРОЦЕССЕ ИОННО-АССИСТИРУЕМОГО ОСАЖДЕНИЯ МЕТАЛЛОВ ИЗ ПЛАЗМЫ ВАКУУМНОГО ДУГОВОГО РАЗРЯДА

© 2024 г. В. В. Поплавский<sup>а, \*</sup>, О. Г. Бобрович<sup>а</sup>, А. В. Дорожко<sup>а</sup>, В. Г. Матыс<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Белорусский государственный технологический университет, Минск, 220006 Беларусь

\*e-mail: vasily.poplav@tut.by

Поступила в редакцию 10.01.2024 г.

После доработки 20.02.2024 г.

Принята к публикации 20.02.2024 г.

Слои на поверхности алюминия, алюминиевого сплава, титана и тантала формировали в процессе ионно-ассистируемого осаждения металлов. Осаждение металла и перемешивание наносимого слоя с поверхностью подложки ускоренными ( $U = 20$  кВ) ионами того же металла осуществляли в экспериментальной установке соответственно из нейтральной фракции паров металла и ионизированной плазмы импульсного вакуумного ( $p \sim 10^{-2}$  Па) дугового разряда. Получены многокомпонентные аморфные слои, содержащие атомы осажденного металла, компоненты материала подложки, включая кислород поверхностной оксидной пленки, а также молекулы углеводородов в качестве примесей. Установлено, что при ионно-ассистируемом осаждении на поверхность исследуемых материалов металлов, обладающих геттерными свойствами (Zr, Cr, Er, Dy и др.), из остаточной атмосферы вакуумной рабочей камеры улавливаются значительные количества газов и включаются в состав формируемого слоя. Следует отметить, что содержание атомов материала подложки в слое невелико. При ионно-ассистируемом осаждении металлов, не проявляющих геттерных свойств, содержание примесей в полученных слоях существенно меньше, в их составе содержатся атомы осажденного металла и материала подложки

**Ключевые слова:** алюминий, титан, тантал, ионно-ассистируемое осаждение металлов, энерго-дисперсионный микроанализ, спектрометрия резерфордовского обратного рассеяния, особенности состава формируемых слоев.

**DOI:** 10.31857/S1028096024090085, **EDN:** EHSMUN

### ВВЕДЕНИЕ

Типичными представителями вентильных металлов, на поверхности которых в атмосфере воздуха образуется оксидная пленка толщиной  $\sim 10$  нм, защищающая металл от коррозии в воздушной среде и в слабоагрессивных средах, являются алюминий, титан и тантал. Контакт между металлом и оксидной пленкой обладает односторонней проводимостью [1]. Этими же свойствами обладают и сплавы металлов.

Вследствие химической инертности эти материалы, в особенности титан, тантал и их сплавы, используют для изготовления стойких к коррозии изделий, эксплуатируемых в условиях, при которых нежелательно разрушение материала и по-

падание его атомов в рабочую среду. Основными направлениями такого применения являются изготовление электродов электрохимических устройств и имплантатов в ортопедии и стоматологии. Для достижения требуемых характеристик в каждом из этих направлений проводят ионно-плазменную обработку поверхности изделий, в том числе и легирование ускоренными ионами металлов.

В условиях работы электродов электрохимических устройств — токовых коллекторов топливных элементов и электролизеров получения водорода с полимерным мембранным электролитом вследствие высокой агрессивности среды коррозионной стойкости материалов, обусловленной на-

личием оксидной пленки, зачастую недостаточно [2–5]. Повышение устойчивости таких изделий к коррозии может быть достигнуто при ионно-плазменном формировании покрытий, а также при ионно-ассистируемом осаждении легирующих металлов [6–9].

Наряду с устойчивостью к коррозии, электроды электролизеров и топливных элементов должны обладать каталитической активностью по отношению к соответствующим электрохимическим процессам. В этом плане перспективным представляется применение ионной имплантации и ионно-ассистируемого осаждения для введения каталитических металлов и активирующих добавок в приповерхностный слой носителей — один из способов формирования нанесенных гетерогенных катализаторов, в том числе и электрокатализаторов [10–12].

В качестве носителей электрокатализаторов используют как углеродные материалы [13], так и вентильные металлы. Ранее были проведены исследования по изучению состава и свойств поверхности электрокатализаторов, формируемых в процессе ионно-ассистируемого осаждения металлов на алюминий [14], титан [15, 16] и тантал [17], а также на специальные углеродные носители AVCarb Carbon Fiber Paper P50 и Toray Carbon Fiber Paper TGP-H-060 T [18]. Электрокатализаторы, сформированные ионно-ассистируемым осаждением платины, платины и одного из редкоземельных металлов (Ce, Gd, Dy, Ho, Yb), а также олова в качестве активирующей добавки, отличающейся очень низким содержанием платины, проявляют высокую активность в реакциях окисления органических спиртов — метанола и этанола, а также в процессе выделения водорода. Формирование активной поверхности при осаждении двух металлов осуществляют в вакууме в два приема, что выгодно отличается от традиционных многостадийных методов приготовления нанесенных катализаторов, основанных на пропитке носителя растворами соединений каждого из осаждаемых металлов, их восстановлении до металлического состояния, многократной отмывке от примесей и сушке.

Титан и его сплавы, а также тантал, обладают биосовместимостью, их широко применяют как материалы имплантатов в ортопедии и стоматологии. Для биомедицинских применений этих материалов также требуется модифицирование поверхности, не только для достижения остеоосовместимости, но и для повышения антибактериальных свойств, чтобы избежать инфекций, связанных с имплантатами [19–21]. Для достижения антибактериальных свойств в приповерхностный

слой имплантатов вводят такие металлы как серебро, золото, медь, цинк, никель, магний, двойные системы этих металлов (Ag/Zn, Mg/Ag, Mg/Zn) или сочетания одного из металлов с азотом или углеродом [19–28]. Обработку поверхности в этих исследованиях проводят с применением плазменно-иммерсионной ионной имплантации или плазменно-иммерсионной ионной имплантации с осаждением [29], при которых обрабатываемый материал погружают в плазму, содержащую ионы легирующего металла.

Таким образом, в важных практических приложениях титана, тантала, алюминия и их сплавов используют введение в приповерхностный слой металлов. Это требуется для повышения коррозионной стойкости изделий из этих материалов, создания активных электрокатализаторов на их основе, достижения бактерицидных свойств имплантатов. Поэтому легирование ускоренными ионами металлов представляется перспективным подходом модифицирования поверхности вентильных металлов.

Стоит отметить, что на процесс формирования легированных металлами слоев могут оказывать существенное влияние наличие оксидной пленки на исходной поверхности и состав компонентов плазмы — источника ионов. Существует необходимость выяснить роль этих факторов и учитывать их при ионно-плазменной обработке поверхности вентильных металлов.

Целью настоящей работы является исследование особенностей состава формируемых в процессе ионно-ассистируемого осаждения металлов из плазмы вакуумного дугового разряда слоев на покрытой оксидной пленкой поверхности вентильных металлов: алюминия, титана и тантала.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследуемые слои формировали в процессе ионно-ассистируемого осаждения (режим ion beam assisted deposition, IBAD) ряда металлов на поверхности подложек из алюминия марки А7, алюминиевого сплава Д16Т, технически чистого титана ВТ1-0 и тантала. Использовали подложки из сплавов Д16Т, ВТ1-0 и тантала в виде пластин размерами 25 × 7 × 1 мм; из алюминия А7 — 25 × 7 × 0.2 мм.

Перед формированием слоев образцы титана и тантала с целью удаления поверхностных загрязнений подвергали предварительному травлению в смеси фтористоводородной кислоты с массовой долей HF 40% (ГОСТ 10484-78) и азотной кислоты концентрацией 56% (ТУ 2612-046-05761643-95)

при объемном соотношении указанных растворов HF и HNO<sub>3</sub> 3:1. Предварительная подготовка подложек из сплава Д16Т включала механическую полировку с применением абразивной полировальной пасты “Полихим-ЭКО-ГОИ” ППМК-ЛР, промывку и обезжиривание в этаноле, образцов из алюминия А7 — только обезжиривание.

Формирование исследуемых слоев проводили в процессе ионно-ассистируемого осаждения ряда металлов в режиме, при котором в качестве ассистирующих процессу осаждения использованы ионы осаждаемого металла. Осаждение металла и перемешивание осаждаемого слоя с поверхностным слоем подложки ускоренными ионами того же металла проводили в экспериментальной установке, соответственно, из нейтральной фракции пара и плазмы, образующейся в парах металла вакуумного дугового разряда, возбуждаемого в работающем в импульсном режиме электродуговом ионном источнике. Испарение осаждаемого металла и ионизация его атомов происходят в низковольтном вакуумном дуговом разряде между двумя электродами из осаждаемого металла при их периодическом соприкосновении. Размеры электродов ионного источника в виде пластин прямоугольной формы размерами порядка 15 × 10 × 1 мм несколько различны для разных металлов. Контакт электродов осуществляли в результате возвратно-поступательного движения одного из них под действием электромеханического привода. Дуговой разряд возбуждается во время и в месте соприкосновения подвижного электрода с неподвижным. Частота следования импульсов разряда составляла 50 Гц. Подложки для осаждения металлов находятся под высоким отрицательным потенциалом, ускоряющим ионы металла из плазмы разряда. Ускорение ассистирующих ионов осуществляли напряжением 20 кВ, в качестве источника которого использован высоковольтный блок питания SH-0105/–20 kV. В рабочей камере поддерживали вакуум ~10<sup>-2</sup> Па.

Контроль процесса формирования слоев осуществляли посредством регулирования режима работы ионного источника и определения заряда, переносимого ассистирующими ионами, путем интегрирования силы ионного тока. Режим работы источника зависит от рода металла. При анализе особенностей состава слоев, формируемых на поверхности вентильных металлов при осаждении различных металлов — геттерных и не обладающих способностью связывать молекулы газов вследствие хемосорбции, достаточно оперировать усредненными параметрами. Среднее значение плотности ионного тока ~5 мкА/см<sup>2</sup>; отношение потока ионов к потоку атомов осажда-

емого металла составляло, в среднем, ~0.2. При формировании слоев с различным содержанием осаждаемого металла длительность обработки составляла от 0.5 до 2 ч. Процесс проводили при комнатной температуре. Держатель образцов размером 60 × 50 мм, на котором размещали серию образцов различных материалов для обработки ускоренными ионами одного вида в идентичных условиях, располагали на расстоянии 70 мм от ионного источника.

Морфологию и состав получаемых поверхностных слоев исследовали методами растровой электронной микроскопии, энергодисперсионного рентгеновского электронно-зондового анализа и спектрометрии резерфордского обратного рассеяния.

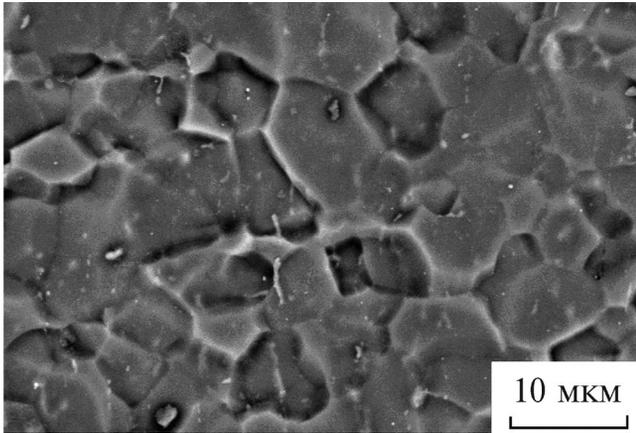
Исследования поверхности образцов методом электронной микроскопии совместно с энергодисперсионным анализом проведены с применением электронного микроскопа LEO 1455 VP (Karl Zeiss Group) в сочетании со спектрометром Aztec Energy Advanced X-Max80 (Oxford Instruments). Энергия электронов составляла 20 кэВ.

Исследование состава слоев методом спектрометрии резерфордского обратного рассеяния (ROP) проведено с применением ускорительного комплекса AN-2500 (High Voltage Engineering Europe). Измерены спектры рассеяния ионов <sup>4</sup>He при различных значениях их начальной энергии E<sub>0</sub> в интервале от 1.0 до 2.0 МэВ. Спектры снимали при нормальном падении пучка анализирующих частиц на поверхность образца и угле рассеяния θ = 170°. Энергетическое разрешение спектрометра с поверхностно-барьерным кремниевым детектором составляло 18 кэВ.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

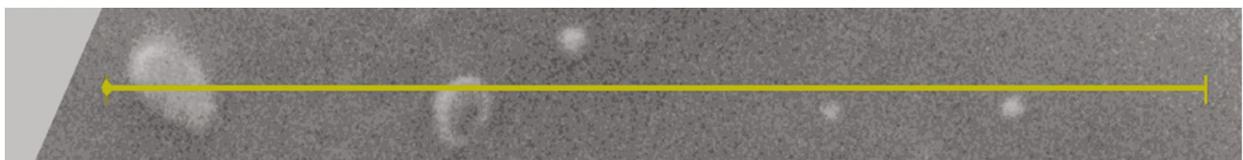
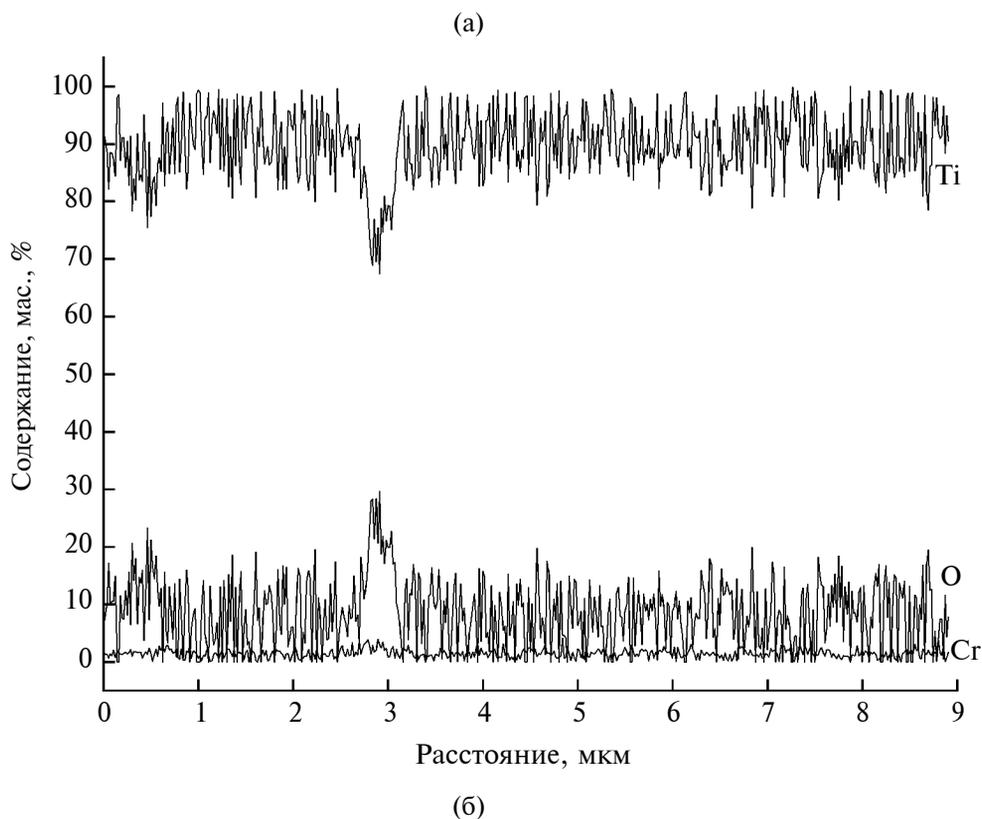
Исследования методом электронной микроскопии показывают, что морфология поверхности образцов при формировании на них легированных осаждаемыми металлами слоев не изменяется. Исследование поверхности образцов методом энергодисперсионного анализа позволило обнаружить в их составе атомы осаждаемых металлов и основных компонентов материала подложки, а также кислорода и углерода. Распределены атомы элементов по поверхности практически равномерно. Имеются включения осаждаемых металлов размером порядка нескольких микрометров, что обусловлено осаждением капель металла из дугового разряда ионного источника.

Например (рис. 1), структура поверхности титанового сплава ВТ1-0 после ионно-ассистиру-



**Рис. 1.** Изображение участка поверхности образца титанового сплава ВТ1-0 с поверхностным слоем, полученным в процессе ионно-ассистированного осаждения хрома.

емого осаждения хрома, воспроизводит морфологию самой подложки с размерами кристаллитов  $\sim(5-10)$  мкм. По данным энергодисперсионного анализа в состав исследуемого слоя входят атомы Ti (52 ат. %), С (30 ат. %), О (17 ат. %) и Cr (1 ат. %). Источниками кислорода являются оксидная пленка на поверхности титанового сплава и сорбция газа из остаточной атмосферы вакуумной камеры; источником углерода — сорбция углеводородов — компонентов вакуумного масла. Содержание хрома невелико, составляет, по данным энергодисперсионного анализа, около 1%. Следует, однако, отметить, что метод дает информацию об элементном составе поверхностного слоя толщиной  $\sim 1$  мкм. Тогда как толщина модифицируемого методом ионно-ассистированного осаждения поверхностного слоя по данным спектрометрии Резерфордского обратного рассеяния составляет несколько десятков нанометров

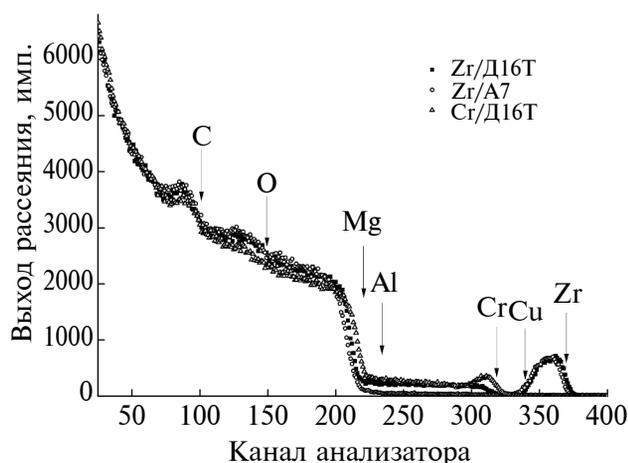


**Рис. 2.** Распределение титана, кислорода и хрома (а) вдоль линии сканирования (б) поверхности образца сплава ВТ1-0 со слоем, сформированным в процессе ионно-ассистированного осаждения хрома (по данным энергодисперсионного анализа, без учета углерода).

с атомным содержанием осаждаемого металла ~10%. Распределение капельной фазы частиц хрома коррелирует с распределением по поверхности кислорода (рис. 2), что может быть обусловлено образованием оксидной фазы.

В то же время определение фазового состава формируемых слоев затруднено из-за их малой толщины и отсутствия кристаллической структуры. Так, при исследовании методом дифракции отраженных электронов слоев, полученных при ионно-ассистируемом осаждении хрома на алюминий [30], платины на тантал [17] и стеклоуглерод [31], установлено, что слои, формируемые в используемом режиме ионно-ассистируемого осаждения, характеризуются аморфной атомной структурой.

При исследовании с применением спектрометрии резерфордовского обратного рассеяния установлено, что в процессе ионно-ассистируемого осаждения металлов из плазмы электродугового разряда и перемешивания осаждаемых атомов с подложкой ускоренными ионами формируются многокомпонентные слои, в состав которых входят атомы материала подложки, осажденных металлов и технологических примесей [14–18, 30, 31]. Анализ профилей распределения легирующих металлов показал, что при их осаждении на углеродные подложки [31] и при осаждении платины на алюминий [14], титан [15, 16] и тантал [17] концентрация атомов в максимуме распределения, расположенном вблизи поверхности на глубине ~ (5–10) нм, составляет несколько (примерно до десяти) атомных процентов. Рас-



**Рис. 3.** Спектры резерфордовского обратного рассеяния ионов  $^4\text{He}$  на ядрах атомов элементов, входящих в состав слоев, сформированных на поверхности алюминия А7 (Zr/А7) и алюминиевого сплава Д16Т (Zr/Д16Т и Cr/Д16Т) в процессе ионно-ассистируемого осаждения циркония и хрома.  $E_0 = 1.3$  МэВ.

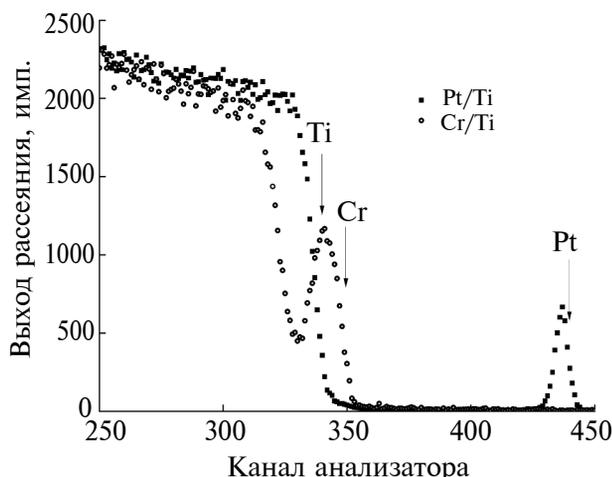
пределены атомы металла с постепенным уменьшением их содержания примерно до 100 нм. Основным компонентом слоя является материал подложки.

При ионно-ассистируемом осаждении на поверхность вентильных металлов переходных металлов, обладающих геттерными свойствами (Zr, Cr, Er, Dy и др.), обнаруживаются особенности состава формируемых слоев и распределения атомов компонентов слоев по глубине. Имеют место захват значительного количества газов из остаточной атмосферы вакуумной рабочей камеры и включение их в состав формируемого слоя. Кроме того, титан и тантал также проявляют способность в атомарном состоянии химически связывать молекулы газов с образованием нелетучих соединений, эти металлы используют в вакуумной технике в качестве испаряемых геттеров.

По данным спектрометрии резерфордовского обратного рассеяния в составе слоев, получаемых при осаждении геттерных металлов, содержится незначительное количество атомов материала подложки и наряду с легирующим металлом преобладают другие элементы, прежде всего кислород и углерод. При ионно-ассистируемом осаждении металлов, не проявляющих геттерных свойств (например, Ir, Pt), содержание примесей в полученных слоях существенно меньше, в их составе содержатся атомы осажденного металла и материала подложки.

Так, анализ спектров (рис. 3) рассеяния ионов  $^4\text{He}$  на ядрах атомов элементов в слоях, полученных на алюминии и алюминиевом сплаве, по расположению сигналов рассеяния от поверхности образцов, обозначенных на рис. 3 вертикальными стрелками, показывает, что алюминий и компоненты сплава Д16Т (Al, Mg, Cu) практически не выходят на поверхность. Содержание атомов этих металлов в слоях составляет  $\sim 5 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ , в то время как содержание атомов циркония и хрома —  $4 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ . Содержание в слоях атомов легких элементов значительное: кислорода —  $\sim (1-2) \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ , углерода —  $\sim (5-7) \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ . Толщина формируемых слоев зависит от содержания осажденного металла и составляет  $\sim (30-50)$  нм.

Аналогичные результаты получены и при исследовании слоев, сформированных на поверхности титана. На рис. 4 приведены спектры резерфордовского обратного рассеяния образцов титанового сплава ВТ1-0 со слоями, полученными в процессе ионно-ассистируемого осаждения платины и хрома. При осаждении платины в поверхностном слое присутствуют оба металла —



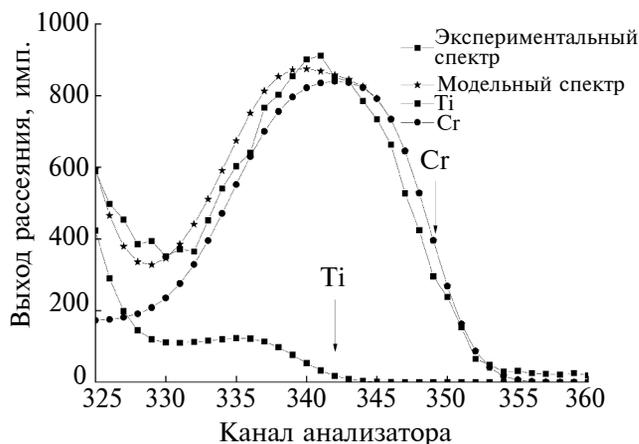
**Рис. 4.** Спектры резерфордского обратного рассеяния ионов  $^4\text{He}$  на ядрах атомов элементов, входящих в состав слоев, сформированных на поверхности образцов титанового сплава ВТ1-0 со слоями, полученными в процессе ионно-ассистированного осаждения платины (Pt/Ti) и хрома (Cr/Ti).  $E_0 = 1.0$  МэВ.

платина и титан, осажденный металл и материал подложки (спектр Pt/Ti). В то же время выход рассеяния ионов  $^4\text{He}$  на ядрах атомов титана в составе слоя, сформированного при осаждении хрома, (спектр Cr/Ti) сильно ослаблен, что может свидетельствовать об отсутствии атомов Ti на поверхности образца.

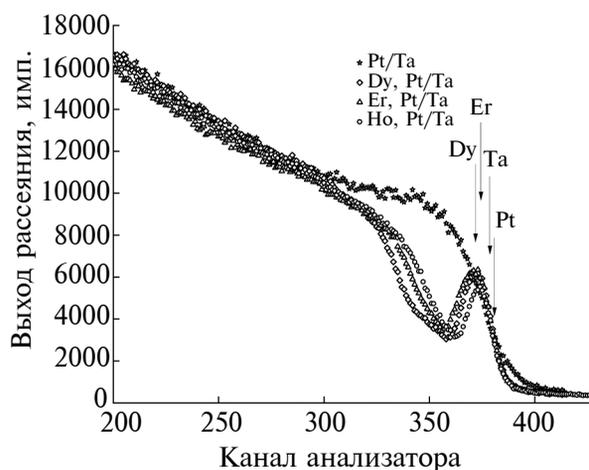
Моделирование спектра резерфордского обратного рассеяния ионов  $^4\text{He}$  на ядрах атомов элементов в слое, полученном при ионно-ассистированном осаждении хрома на титан, дает удовлетворительное соответствие с экспериментом при учете наличия в составе слоя титана, хрома, кислорода, углерода, а также водорода, который не идентифицируется методом резерфордского обратного рассеяния. Следует отметить, что моделирование подтверждает незначительное содержание титана вблизи поверхности (рис. 5).

Наличие кислорода в формируемых слоях обусловлено оксидной пленкой на поверхности металлов, а также сорбционными процессами. Наличие водорода наряду со значительным количеством углерода может свидетельствовать о том, что в состав слоев входят молекулы углеводородов — компоненты рабочей жидкости диффузионного вакуумного насоса.

На рис. 6 представлены спектры резерфордского обратного рассеяния ионов  $^4\text{He}$  на ядрах атомов элементов, входящих в состав слоев, сформированных на поверхности тантала в процессе ионно-ассистированного осаждения платины (Pt/Ta), эрбия и платины (Er, Pt/Ta), диспрозия и платины (Dy, Pt/Ta), гольмия и платины (Ho, Pt/Ta).  $E_0 = 1.0$  МэВ.

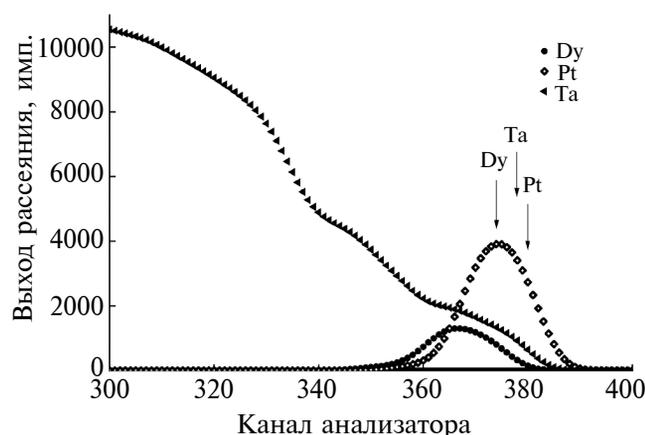


**Рис. 5.** Участок спектра резерфордского обратного рассеяния ионов  $^4\text{He}$  на ядрах атомов титана и хрома, входящих в состав слоя, сформированного на сплаве титана ВТ1-0 в процессе ионно-ассистированного осаждения хрома, в сравнении со спектром, полученным с помощью моделирования с учетом наличия в составе слоя элементов: Cr, Ti, O, C, H.  $E_0 = 1.0$  МэВ.



**Рис. 6.** Спектры резерфордского обратного рассеяния ионов  $^4\text{He}$  на ядрах атомов элементов, входящих в состав слоев, сформированных на поверхности тантала в процессе ионно-ассистированного осаждения платины (Pt/Ta), эрбия и платины (Er, Pt/Ta), диспрозия и платины (Dy, Pt/Ta), гольмия и платины (Ho, Pt/Ta).  $E_0 = 1.0$  МэВ.

Слоевое содержание в образцах каждого из осажденных металлов составляет  $\sim(3-6) \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ . Поочередное осаждение на поверхность тантала одного из редкоземельных металлов (Er, Dy, Ho) и платины приводит к формированию слоев, в составе которых также значительное содержание легких примесей и незначительное содержание вблизи поверхности атомов материала подложки — тантала (рис. 6), что в частности подтверждается моделированием спектра Dy, Pt/Ta (рис. 7). В то время как при осаждении



**Рис. 7.** Участок модельного спектра резерфордского обратного рассеяния ионов  $^4\text{He}$  на ядрах атомов диспрозия, платины и тантала, входящих в состав слоя, сформированного на поверхности тантала в процессе поочередного ионно-ассистированного осаждения диспрозия и платины, полученного с учетом наличия в составе слоя элементов: Dy, Ta, Pt, O, C, H.  $E_0 = 1.0$  МэВ.

только платины (спектр Pt/Ta) сформирован слой с меньшим содержанием примесей, включающий платину и тантал.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследовали особенности состава слоев, формируемых на поверхности вентильных металлов, покрытой в естественных условиях оксидной пленкой, при ионно-ассистированном осаждении металлов, обладающих геттерными свойствами и инертных, не обладающих способностью связывать молекулы газов вследствие хемосорбции.

Слои на поверхности алюминия марки А7, алюминиевого сплава Д16Т, титанового сплава (технически чистого титана) ВТ1-0 и тантала формировали в процессе ионно-ассистированного осаждения ряда металлов из плазмы вакуумного ( $p \sim 10^{-2}$  Па) дугового разряда импульсного ионного источника в режиме, при котором металл вводится в формируемый слой в неравновесных условиях обработки ускоренными ( $U = 20$  кВ) ионами осаждаемого металла. Состав слоев исследовали с применением энергодисперсионного рентгеновского анализа и спектрометрии резерфордского рассеяния. Получены многокомпонентные аморфные слои толщиной  $\sim (30-50)$  нм, содержащие атомы осаждаемого металла, компоненты материала подложки, включая кислород поверхностной оксидной пленки, а также молекулы углеводородов в качестве примесей. Выяснено влияние наличия оксидной пленки

на исходной поверхности вентильных металлов и состава компонентов плазмы — источника ионов на состав получаемых слоев.

Установлено, что при ионно-ассистированном осаждении на поверхность исследуемых материалов металлов, обладающих геттерными свойствами (Zr, Cr, Er, Dy и др.), из остаточной атмосферы вакуумной рабочей камеры улавливается значительное количество газов, которые включаются в состав формируемого слоя. Однако содержание атомов материала подложки вблизи поверхности слоя невелико. Легированный геттерным металлом слой локализован практически в содержащем технологические примеси оксидном слое, толщина которого увеличивается за счет хемосорбции газов.

При ионно-ассистированном осаждении металлов, не проявляющих геттерных свойств, содержание примесей в полученных слоях существенно меньше, в их составе содержатся атомы осаждаемого металла и материала подложки. Основным компонентом слоя является материал подложки.

Ионно-плазменная обработка вентильных металлов с введением легирующих металлов в приповерхностный слой применяется для повышения коррозионной стойкости изделий из сплавов этих металлов, создания активных электрокатализаторов на их основе, достижения бактерицидных свойств имплантатов. Полученные данные об особенностях состава формируемых слоев и распределения атомов компонентов в слоях могут быть полезными при планировании процесса ионного легирования.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках Государственной программы научных исследований Республики Беларусь “Материаловедение, новые материалы и технологии”.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность С.В. Гусковой за экспериментальное проведение исследований методами электронной микроскопии и энергодисперсионного анализа, Ф.Ф. Комарову и В.В. Пилько — за получение спектров резерфордского обратного рассеяния.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Electrochemical Dictionary & Encyclopedia. (2023) the Electrochemical Society, Inc. Cited December 2023. <https://knowledge.electrochem.org/ed/dict.htm#V>
2. *Tawfik H.* Hydrogen, Methanol and Ethanol PEM Fuel Cell Development at IRTT. // Proc. Energy Long Island Conf. 2007. <https://www.aertc.org/conferences/conference-2007/index.php/tawfik.pdf>
3. *Gago A.S., Ansar A.S., Gazdzicki P., Wagner N., Arnold J., Friedrich K.A.* // ECS Trans. 2014. V. 64. Iss. 3. P. 1039. <https://doi.org/10.1149/06403.1039ecst>
4. *Liu J., Chen F., Chen Y., Zhang D.* // J. Power Sources. 2009. V. 187. P. 500. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.11.086>
5. *Wang J.T., Wang C., Mao Z.Q.* // Int. J. Hydrogen Energy. 2012. V. 37. P. 12069. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.04.146>
6. *Поплавский В.В., Дорожко А.В., Матыс В.Г., Смягликов И.П., Селифанов С.О.* // Известия ВУЗов. Физика. 2015. Т. 58. С. 126.
7. *Поплавский В.В., Дорожко А.В., Матыс В.Г., Смягликов И.П., Селифанов С.О.* Формирование защитных слоев на поверхности токовых коллекторов из титана осаждением хрома из плазмы газового и вакуумного разрядов. // Матер. 11-й Междунар. конф. Взаимодействие излучений с твердым телом, Минск. 2015. С. 365.
8. *Poplavsky V.V., Dorozhko A.V., Matys V.G.* Composition And Corrosion Properties Of Layers Formed On Aluminum Substrates By Ion Beam Assisted Metals Deposition From Vacuum Arc Discharge Plasma. // Тез. докл. 50-й междунар. Тулиновской конф. по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, Москва. 2021. С. 126.
9. *Поплавский В.В., Дорожко А.В., Матыс В.Г.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2016. № 9. С. 104. <https://doi.org/10.7868/S0207352816050152>
10. *Слинкин А.А.* // Итоги науки и техники. Кинетика и катализ. 1982. Т. 10. С. 5.
11. *Komarov F.F., Poplavskij V.V.* // Radiat. Effects. 1988. V. 106. P. 1. <https://doi.org/10.1080/00337578808013724>
12. *Wolf G.K.* // J. Vac. Scie. Technol. A. 1992. V. 10. P. 1757. <https://doi.org/10.1116/1.577743>
13. *Gullá A.F., Saha M.S., Allen R.J., Mukerjee S.* // Electrochem. Solid State Lett. 2005. V. 8. Iss. 10. P.A504. <https://doi.org/10.1149/1.2008887>
14. *Поплавский В.В., Мищенко Т.С., Матыс В.Г.* // ЖТФ. 2010. Т. 80. С. 138. <https://doi.org/10.1134/S1063784210020222>
15. *Поплавский В.В., Мищенко Т.С., Матыс В.Г.* // Персп. Материалы. 2009. № 6. С. 12.
16. *Поплавский В.В., Мищенко Т.С., Матыс В.Г.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2010. № 7. С. 33. <https://doi.org/10.1134/S1027451010040051>
17. *Поплавский В.В., Стельмах Т.С., Матыс В.Г.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2012. № 9. С. 45. <https://doi.org/10.1134/S1027451012090121>
18. *Поплавский В.В., Дорожко А.В., Матыс В.Г.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2019. № 12. С. 94. <https://doi.org/10.1134/S102745101905032X>
19. *Xue T., Attarilar S., Liu S., Liu J., Song X., Li L., Zhao B., Tang Y.* // Front. Bioeng. Biotechnol. 2020. V. 8. P. 603072. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.603072>
20. *Mani G., Porter D., Grove K., Collins S., Ornberg A., Shulfer R.* // J. Biomed. Mater. Res. A. 2022. V. 110. P. 1291. <https://doi.org/10.1002/jbm.a.37373>
21. *Ge X., Li T., Yu M., Zhu H., Wang Q., Bi X., Xi T., Wu X., Gao Y.* // Biomedical Engineering. 2022. V. 3. <https://doi.org/10.1515/bmt-2022-0211>
22. *Liu J., Liu J., Attarilar S., Wang C., Tamaddon M., Yang C., Xie K., Yao J., Wang L., Liu C., Yujin Tang Y.* // Front. Bioeng. Biotechnol. 2020. V. 8. P. 576969. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.576969>
23. *Chen Z., Wang Z., Qiu W., Fang F.* // Front. Bioconjugate Chem. 2021. V. 32. P. 627. <https://doi.org/10.1021/acs.bioconjchem.1c00129>
24. *Wan R., Chu S., Wang X., Lei L., Tang H., Hu G., Dong L., Li D., Gu H.* // J. Biomed. Mater. Res. B. 2020. V. 108. P. 3008. <https://doi.org/10.1002/jbm.b.34630>
25. *Li L., Li Q., Zhao M., Dong L., Wu J., Li D.* // ACS Biomater. Sci. Eng. 2019. V. 5. P. 3303. <https://doi.org/10.1021/acsbiomaterials.9b00248>
26. *Hempel F., Finke B., Zietz C., Bader R., Weltmann K. D., Polak M.* // Surf. Coat. Technol. 2014. V. 256. P. 52. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.01.027>
27. *Wang L., Luo Q., Zhang X., Qiu J., Qian S., Liu X.* // Bioact Mater. 2021. V. 6. P. 64. <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2020.07.012>
28. *Chao X., Cai D., Ji T., Li K., Qiao Y., Liu X.* // ACS Biomater. Sci. Eng. 2018. V. 4. P. 3185. <https://doi.org/10.1021/acsbiomaterials.8b00501>
29. *Xin Y.C., Chu P.K.* // Surface Engineering of Light Alloys. 2010. P. 362. <https://doi.org/10.1533/9781845699451.2.362>
30. *Poplavsky V.V., Komarov F.F., Luhn V.G., Pil'ko V.V., Partyka J.* // Acta Phys. Polon. A. 2015. V. 128. P. 946. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.128.946>
31. *Поплавский В.В., Дорожко А.В.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2013. № 4. С. 9. <https://doi.org/10.1134/S1027451013020444>

## Features of the Formation of Layers on the Surface of Valve Metals in the Process of Ion Beam Assisted Deposition of Metals from Vacuum Arc Discharge Plasma

V.V. Poplavsky<sup>1,\*</sup>, A.G. Babrovich<sup>1</sup>, A.V. Dorozhko<sup>1</sup>, V.G. Matys<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Belarusian State Technological University, Minsk, 220006 Belarus

\*e-mail: vasily.poplav@tut.by

Layers on the surface of aluminum, aluminum alloy, titanium and tantalum was formed by ion beam assisted deposition of metals. Formation of layers in ion beam assisted deposition mode, by means of the deposition of metal and mixing of precipitating layer with the substrate by accelerated ( $U = 20$  kV) ions of the same metal from metal vapor and ionized plasma of vacuum ( $\sim 10^{-2}$  Pa) pulsed electric arc discharge, was carried out. Multicomponent amorphous layers containing atoms of the deposited metal, components of the substrate material, including oxygen of the surface oxide film, as well as hydrocarbon molecules as impurities were obtained. It is established that during ion beam assisted deposition of metals with getter properties (Zr, Cr, Er, Dy, etc.) on the surface of the studied materials, significant amounts of gases are captured from the residual atmosphere of the vacuum working chamber and are included in the composition of the formed layer. At the same time, the content of atoms of the substrate material in the layer is small. With ion beam assisted deposition of metals that do not exhibit getter properties, the content of impurities in the resulting layers is significantly less, their composition contains atoms of the deposited metal and the substrate material.

**Keywords:** aluminum, titanium, tantalum, ion beam assisted deposition of metals, energy dispersive microanalysis, Rutherford backscattering spectrometry, composition of the formed layers.