

УДК 620.197.5:539.25:539.23:537.533.9

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА И СВОЙСТВ ЗАЩИТНЫХ СЛОЕВ, ФОРМИРУЕМЫХ НА ПОВЕРХНОСТЯХ СТАЛЕЙ ИОННО-АССИСТИРУЕМЫМ ОСАЖДЕНИЕМ КАДМИЯ, ЦИНКА И АЛЮМИНИЯ

© 2016 г. В. В. Поплавский*, А. В. Дорожко, В. Г. Матыс

Белорусский государственный технологический университет, 220006 Минск, Беларусь

*E-mail: vasily.poplav@tut.by

Поступила в редакцию 22.09.2015 г.

Исследованы слои, формируемые в процессе вакуумного осаждения кадмия, цинка и алюминия на поверхности углеродистой и нержавеющей сталей с целью защиты алюминия и алюминиевых сплавов от коррозии при их контакте со стальными деталями. Защитные слои сформированы в режиме ионно-ассистируемого осаждения, при котором осаждение металла и перемешивание осаждаемого слоя с атомами поверхности подложки ускоренными ($U = 5$ кВ) ионами того же металла осуществляются, соответственно, из нейтральной фракции пара и плазмы вакуумного дугового разряда импульсного электродугового ионного источника. Морфология и состав получаемых поверхностных слоев исследованы методами растровой электронной микроскопии, рентгеновского электронно-зондового микроанализа и спектрометрии резерфордовского обратного рассеяния. Установлено, что в состав слоев входят атомы осаждаемого металла, материала подложки, а также кислорода и углерода. Толщина слоев составляет $\sim 50\text{--}80$ нм, содержание осаждаемого металла в них $\sim (1.0\text{--}3.5) \times 10^{17}$ ат./см². Испытания коррозии алюминия и алюминиевого сплава при контакте с исследуемыми материалами подтверждают эффективность ионно-лучевого модифицирования поверхности сталей.

Ключевые слова: ионно-ассистируемое осаждение металлов, углеродистая и нержавеющая стали, растровая электронная микроскопия, электронно-зондовый микроанализ, спектрометрия резерфордовского обратного рассеяния, контактная коррозия.

DOI: 10.7868/S0207352816050152

ВВЕДЕНИЕ

Алюминий и его сплавы при контакте со сталями могут подвергаться интенсивной коррозии. В частности, это имеет место при фиксации конструкций на основе алюминия с применением стального крепежа. Одним из методов защиты алюминия и его сплавов от контактной коррозии является нанесение на стальные детали металлических покрытий, гальванически совместимых с алюминием. Наиболее подходящими являются кадмиевые и цинковые покрытия, которые имеют близкие с алюминием электродные потенциалы [1]. Гальванические методы осаждения таких покрытий не лишены недостатков, важнейшие из которых связаны как с экологическими, так и с техническими проблемами. Электрохимическое осаждение алюминия из водных растворов невозможно. В этой связи целесообразно исследовать возможности применения альтернативных гальваническому вакуумных методов формирования покрытий [2–4].

Цель настоящей работы — исследование состава слоев, формируемых на поверхностях нержа-

вующей и углеродистой сталей в процессе ионно-ассистируемого осаждения кадмия, цинка и алюминия из плазмы импульсного дугового разряда, и возможностей ионно-лучевой технологии при получении защитных слоев для ослабления коррозии конструкций из алюминия и алюминиевых сплавов, контактирующих со стальными деталями.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве подложек при формировании слоев взяты образцы углеродистой стали Ст3 и нержавеющей стали 12Х18Н9Т в виде пластин размером $25 \times 7 \times 1$ мм. Слои сформированы путем ионно-ассистируемого осаждения кадмия, цинка и алюминия в режиме, при котором осаждение металла и перемешивание осаждаемого слоя с поверхностью подложки ускоренными ионами того же металла осуществляются, соответственно, из нейтральной фракции пара и плазмы вакуумного дугового разряда импульсного электродугового ионного источника [5]. Частота следования импульсов разряда составляла 50 Гц. Ассистирующие ионы ускоря-

лись напряжением 5 кВ. В качестве источника ускоряющего напряжения был использован высоковольтный блок питания SH-0105/–20 кВ. В рабочей камере поддерживался вакуум $\sim 10^{-2}$ Па. Предварительная подготовка подложек включала механическую полировку с использованием абразивной полировальной пасты “Полихим-ЭКО-ГОИ” ППМК-ЛР, промывку и обезжиривание в этаноле.

Морфологию и состав получаемых поверхностных слоев исследовали методами растровой электронной микроскопии, рентгеновского электронно-зондового микроанализа и спектрометрии резерфордовского обратного рассеяния. Электронно-микроскопические исследования поверхности образцов совместно с электронно-зондовым микроанализом с дисперсией по энергии квантов характеристического рентгеновского излучения, испускаемого атомами элементов, входящих в состав анализируемых слоев, проведены с применением электронного микроскопа JSM-5610LV и кремний-литиевого анализатора EDXJED-2201 (JEOL). Снимались также карты распределения элементов по поверхности исследуемых слоев. Энергия пучка электронов, сканирующего поверхность, составляла 20 кэВ.

Исследование состава слоев методом спектрометрии резерфордовского обратного рассеяния проведено с применением ускорительного комплекса AN-2500 (High Voltage Engineering Europe). Измерены спектры рассеяния ионов ^4He при их начальной энергии $E_0 = 1.2$ МэВ. Спектры снимались при нормальном падении пучка анализирующих частиц на поверхность образца и угле рассеяния $\theta = 170^\circ$. Энергетическое разрешение спектрометра с поверхностно-барьерным кремниевым детектором составляло 18 кэВ. Осуществлялась стандартная обработка спектров.

Гальваническая совместимость исследуемых образцов сталей с образцами алюминия марки А7 и алюминиевого сплава Д16 изучена в 3% растворе NaCl посредством измерения стационарных электрохимических потенциалов и коррозионных испытаний путем снятия поляризационных кривых в потенциодинамическом режиме при скорости развертки потенциала 1 мВ/с [6]. Снимались кривые катодной поляризации образцов алюминия и сплава Д16 и кривые анодной поляризации образцов сталей с осажденными слоями. Значения предельного тока контактной коррозии анода в соответствующей гальванической паре оценивали по точкам пересечения анодных и катодных поляризационных кривых [7]. Измерения проведены с применением потенциостата IPC-ProMF в стандартной трехэлектродной ячейке. Рабочим электродом являлся исследуемый образец, электродом сравнения – насыщенный хлорсеребряный полуэлемент, вспомогательным электродом – платиновая проволока. Значения

потенциала рабочего электрода при измерениях отсчитаны относительно хлорсеребряного электрода сравнения (Ag/AgCl). Кроме того, проведены ресурсные испытания коррозионной стойкости алюминия А7 и сплава Д16 при контакте с исследуемыми образцами. Исходные и модифицированные образцы сталей включали в состав гальванических пар с алюминием А7 и сплавом Д16. Испытания проведены методом погружения в раствор 3% NaCl + 0.1% H_2O_2 в соответствии с ГОСТ 9.913-90 в течение 20 суток со сменой раствора через каждые пять суток [8]. Показатели коррозии определены на основе измерений потерь массы исследуемых образцов алюминия и сплава.

Наряду с изучением свойств, проявляемых образцами сталей, покрытыми слоями, полученными в процессе ионно-ассистированного осаждения металлов, для сравнения исследовали образцы сталей Ст3 и 12Х18Н9Т с покрытиями, сформированными гальваническим осаждением кадмия и цинка.

Электрохимическое осаждение кадмия проведено из аммиачного раствора, содержащего CdSO_4 , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ и H_3BO_3 , осаждение цинка – из щелочного раствора, включающего ZnO и NaOH , и слабокислого электролита, состоящего из ZnCl_2 , NH_4Cl и блескообразователя. Полученные покрытия подвергались пассивации в растворе, содержащем Cr(III). Предварительно подложки полировали механическим путем. Затем осуществляли многостадийный процесс осаждения, состоящий из определенной последовательности операций (химического обезжиривания подложки, травления и активации в соответствующих растворах и условиях, промывки, непосредственного формирования покрытий, пассивации), которую нельзя было прерывать [9, 10]. При гальваническом осаждении металлов использовали аноды из кадмия и цинка. Толщина гальванических кадмиевых и цинковых покрытий составляла 10 мкм.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Электронно-микроскопические исследования показывают, что морфология поверхности подложек при ионно-ассистированном осаждении металлов практически не изменяется (рис. 1а, 2). В то же время на исследуемой поверхности имеются включения осаждаемых металлов размером порядка нескольких микрометров, что обусловлено осаждением капель металла из дугового разряда ионного источника. Наличие капельных образований чаще всего является нежелательным, поскольку приводит к неоднородности состава и свойств формируемого осаждением из плазмы металлсодержащего покрытия. Для исключения попадания капель на обрабатываемую поверхность применяются специальные системы транс-

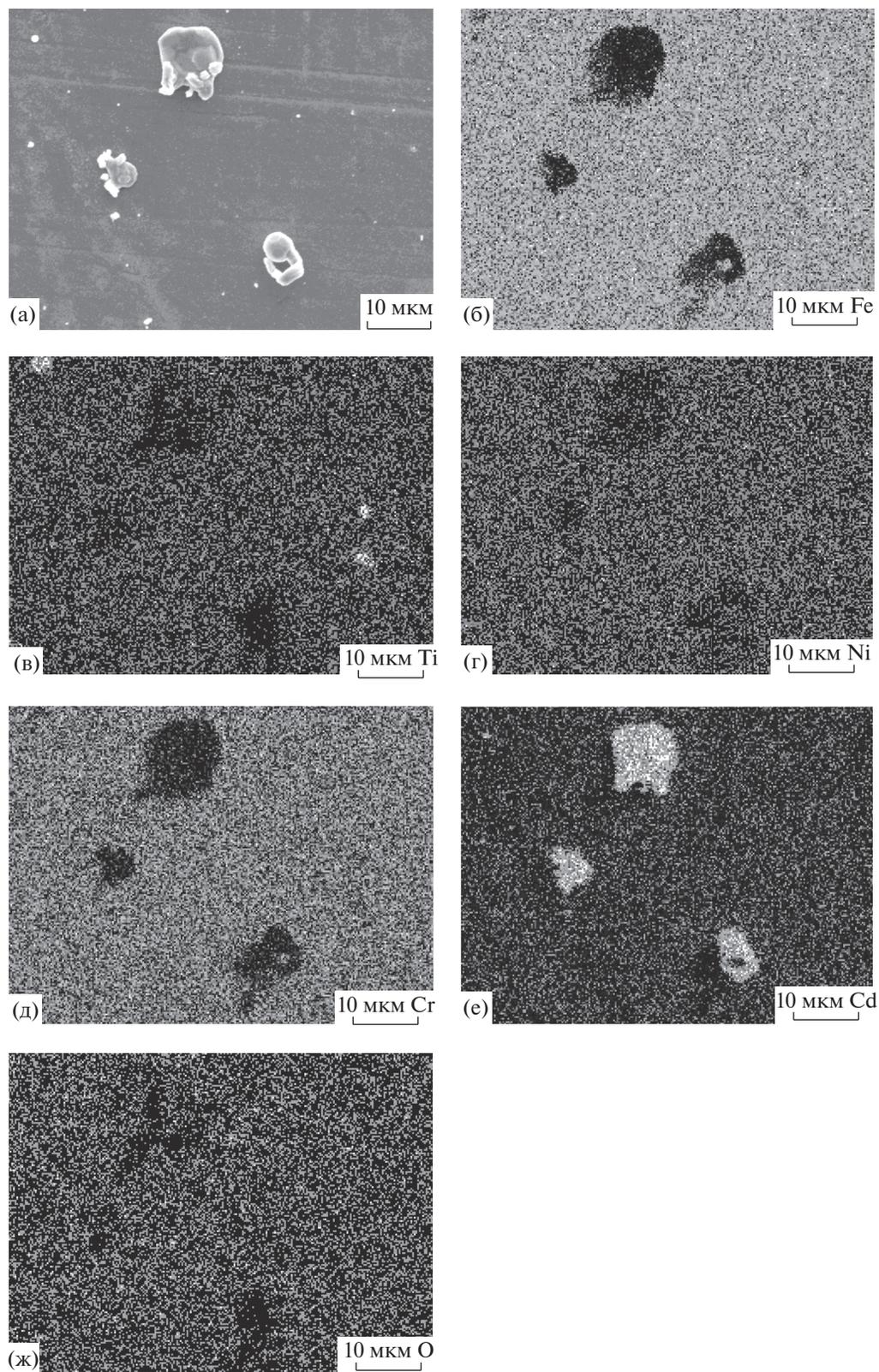


Рис. 1. Электронно-микроскопическое изображение участка слоя, сформированного ионно-ассистируемым осаждением кадмия на поверхности нержавеющей стали 12Х18Н9Т (а) и карты распределения железа (б), титана (в), никеля (г), хрома (д), кадмия (е) и кислорода (ж) по поверхности.

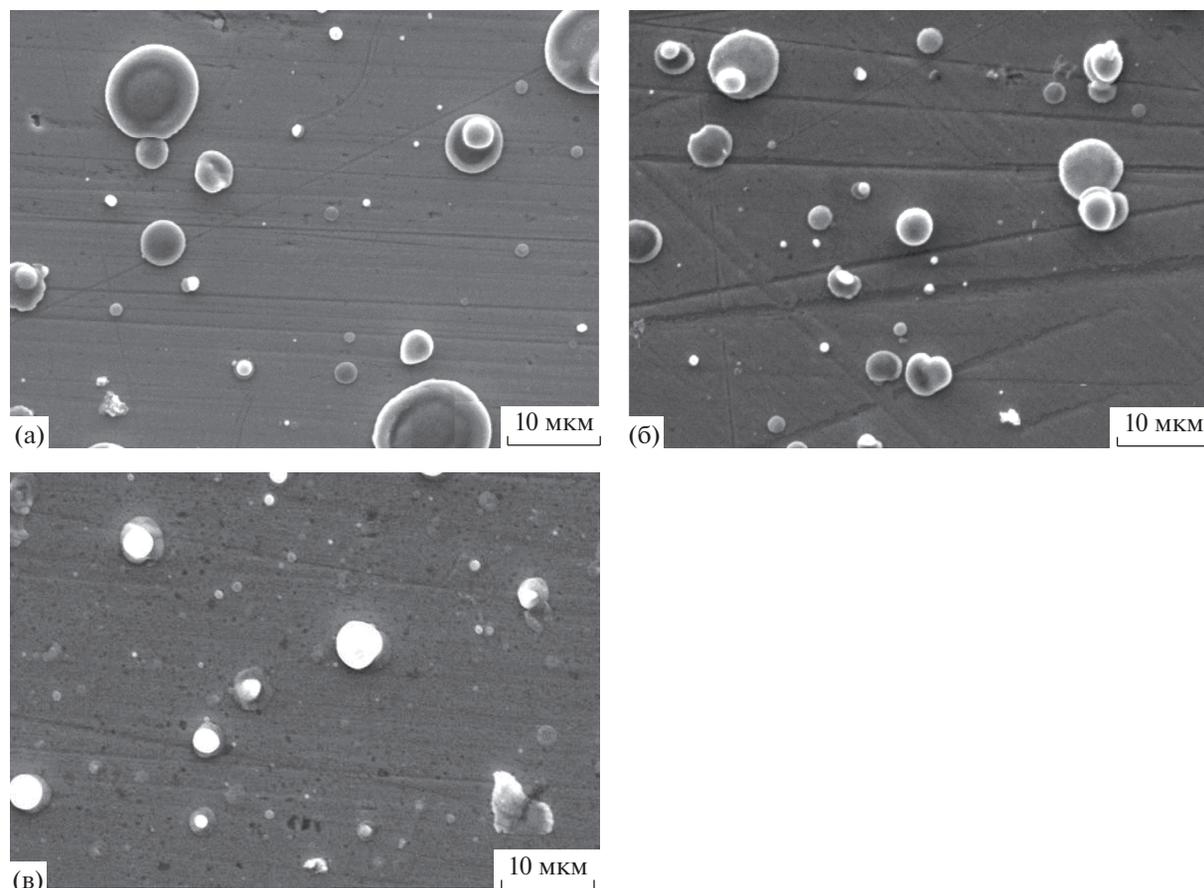


Рис. 2. Электронно-микроскопические изображения слоев, сформированных ионно-ассистированным осаждением цинка на поверхности нержавеющей стали 12X18H9T (а), углеродистой стали Ст3 (б) и осаждением алюминия на поверхности стали 12X18H9T (в).

портировки плазменного потока, принцип действия которых основан на отклонении заряженной фракции в магнитном поле [11]. Однако при этом происходит разделение ионизированной и нейтральной фракций, что не позволяет реализовать используемый режим ионно-ассистированного осаждения.

Исследование слоев методом электронно-зондового микроанализа обнаруживает в их составе атомы осажденных металлов, материала подложки, а также кислорода и углерода. Наличие кислорода обусловлено осаждением из остаточной атмосферы рабочей вакуумной камеры, а также сорбционными процессами. Результаты электронно-зондового микроанализа элементного состава (без учета углерода) поверхности образцов сталей 12X18H9T (StSt) и Ст3 (St3) с осажденными металлами, а также капельных образований приведены в табл. 1. Содержание осажденных металлов в слоях — до 10 ат. %. Анализ карт распределения (рис. 1) показывает, что атомы элементов, входящих в состав слоя, распределены по поверхности, за исключением капельных образований, практи-

чески равномерно. Причем содержание кислорода в составе капельной фазы мало.

Спектры резерфордского обратного рассеяния ионов ^4He на поверхности исследуемых образцов с осажденными металлами представлены на рис. 3 и 4. В табл. 2 приведены оценочные значения основных параметров распределения атомов элементов в слоях, полученные при обработке спектров: содержания атомов осажденного металла и железа в слое; концентрации атомов осажденного металла в максимуме распределения C_{max} на глубине Z_{max} ; толщины Z слоя, содержащего осажденный металл.

Таким образом, при ионно-ассистированном осаждении металлов в предложенном режиме формируются многокомпонентные поверхностные слои, повторяющие морфологию поверхности подложки, с практически равномерным распределением атомов осаждаемого металла по поверхности, за исключением попадающих из дугового разряда источника капель металла размером несколько микрометров. В состав получаемых слоев входят атомы осаждаемого металла, материала подложки, кислорода и

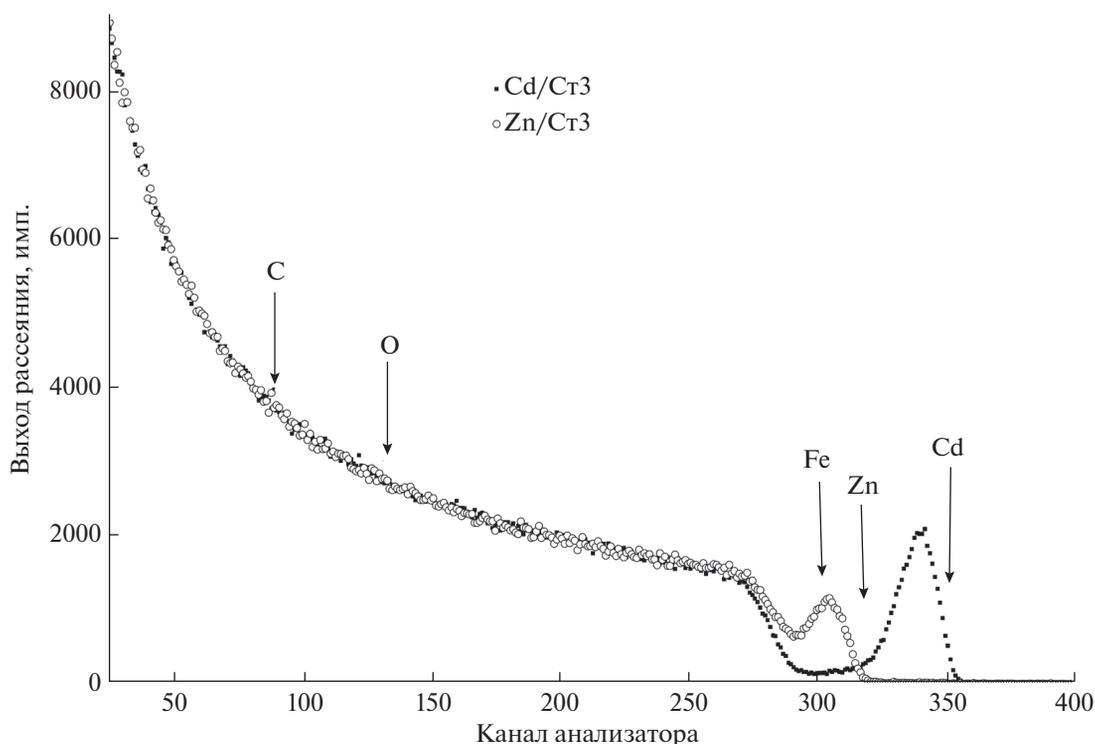
Таблица 1. Элементный состав поверхности образцов сталей с осажденными слоями (по данным электронно-зондового микроанализа)

Элемент	Содержание, ат. %							
	Cd/StSt	Cd/St3	Zn/StSt	Zn/St3	Al/StSt	Cd кап.	Zn кап.	Al кап.
O	4.94	—	2.22	3.00	6.88	3.31	—	7.48
Al	—	—	—	0.41	8.76	0.42	—	89.35
Si	—	0.45	0.81	—	0.70	—	0.65	1.29
Ti	1.14	—	0.32	—	1.11	—	—	—
Cr	18.03	8.18	18.17	—	16.75	—	0.84	0.42
Fe	61.50	87.95	60.09	88.51	56.73	5.15	5.01	1.39
Ni	8.76	—	8.30	—	9.07	—	0.54	0.08
Zn	—	—	10.08	8.08	—	—	92.96	—
Cd	5.62	3.41	—	—	—	91.12	—	—

углерода. По данным спектрометрии резерфордского обратного рассеяния толщина сформированных слоев составляет 50–80 нм, содержание осажденных металлов в них $(1.0–3.5) \times 10^{17}$ ат./см².

При определении гальванической совместимости исследуемых образцов с образцами алюминия А7 и алюминиевого сплава Д16 посредством измерения стационарных электрохимических потенциалов в 3% растворе NaCl установлено, что для образцов с осажденным алюминием значения

стационарного потенциала, лежащие в пределах от –400 до –200 мВ, близки к стационарным потенциалам самих подложек (от –470 до –420 мВ для Ст3 и от –200 до –20 мВ для стали 12Х18Н9Т), что существенно отличается от значений стационарных потенциалов алюминия (от –800 до –680 мВ) и сплава Д16 (от –690 до –610 мВ). Следовательно, эти материалы будут иметь такую же плохую гальваническую совместимость с алюминием, как и стали. Стационарный потенциал сталей со слоями, полученными как ионно-ассистированным, так

**Рис. 3.** Спектры резерфордского обратного рассеяния ионов ⁴He на поверхности углеродистой стали Ст3 со слоями, сформированными ионно-ассистированным осаждением кадмия и цинка.

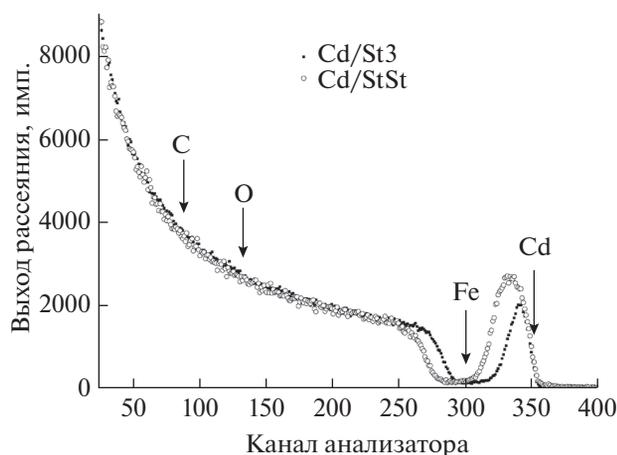


Рис. 4. Спектры резерфордовского обратного рассеяния ионов ^4He на поверхности углеродистой Ст3 (Cd/St3) и нержавеющей 12X18H9T (Cd/StSt) сталей со слоями, сформированными ионно-ассистированным осаждением кадмия.

и гальваническим осаждением цинка, имеет значение, близкое к -1 В. Такое значение потенциала обусловлено окислительно-восстановительными процессами с участием цинка и его поверхностных соединений, образующихся при погружении образцов в раствор NaCl. В коррозионном гальваническом элементе, составленном из образцов сталей с цинксодержащими слоями и алюминия или сплава Д16, стали будут приобретать положительный анодный потенциал и растворяться. Осажденный цинк будет осуществлять защиту алюминия и сплава до тех пор, пока не растворится сам. Для сталей со слоями, полученными осаждением кадмия (обоими методами), характерны значения стационарного потенциала в диапазоне от -670 до -770 мВ, что наиболее близко к стационарному потенциалу

алюминия и сплава Д16 и соответствует наилучшей гальванической совместимости.

Результаты поляризационных исследований гальванической совместимости материалов иллюстрирует рис. 5, на котором приведены кривые катодной поляризации образца сплава Д16 и анодной поляризации образцов сталей со слоями на поверхности, сформированными осаждением кадмия. Значения потенциала U_{cor} и плотности тока j_{cor} контактной коррозии сплава определяются по точкам пересечения аппроксимированных прямыми участками кривых катодной и анодной поляризации материалов, составляющих гальваническую пару, построенных в полулогарифмических координатах. Значение плотности тока, определяемое из поляризационных кривых, называют предельной плотностью тока контактной коррозии [7], поскольку реальная плотность тока в коррозионном гальваническом элементе обычно меньше вследствие омических потерь в растворе электролита. Определенные таким образом значения U_{cor} и j_{cor} усреднялись, и для данных параметров рассчитывалась интервальная оценка в виде радиуса доверительного интервала при доверительной вероятности 0.9.

Данные поляризационных измерений потенциалов и плотностей тока контактной коррозии в 3%-растворе NaCl алюминия и сплава Д16 в контакте с исследуемыми образцами обобщены в табл. 3. Коррозионные характеристики образцов в значительной степени определяются природой осажденного металла и оказываются сопоставимыми по значениям вне зависимости от способа осаждения – ионно-ассистированного либо гальванического. Ионно-ассистированное осаждение алюминия и кадмия на поверхность углеродистой и нержавеющей сталей, а также гальваническое осаждение кадмия приводит к снижению предельных токов контакт-

Таблица 2. Параметры распределения атомов элементов в слоях, сформированных ионно-ассистированным осаждением металлов на поверхности сталей (по данным спектрометрии резерфордовского обратного рассеяния)

Образец	Содержание в слое, 10^{17} ат./см 2				C_{max} , ат. %	Z_{max} , нм	Z , нм
	Cd	Zn	Al	Fe			
Cd/StSt	3.4	–	–	5.8	80	25	80
Cd/St3	2.2	–	–	6.2	75	13	70
Zn/St3	–	1.2	–	3.5	45	20	50
Al/St3	–	–	1.7	3.5	50	25	50

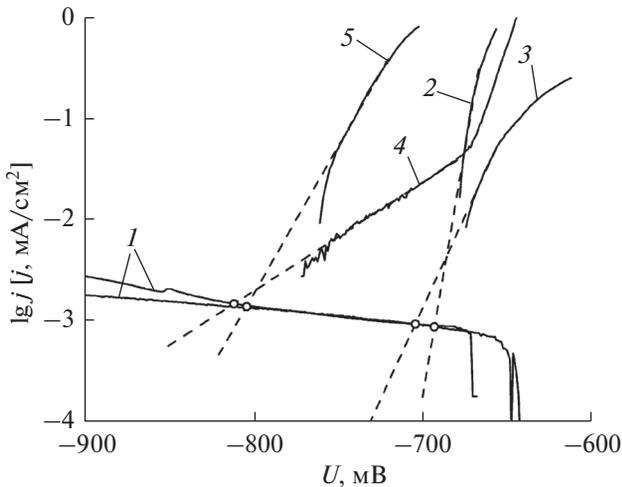


Рис. 5. Поляризационные кривые, полученные в 3%-растворе NaCl при скорости изменения потенциала 1 мВ/с, образцов сплава Д16 и сталей со слоями на поверхности, сформированными осаждением кадмия: 1 – кривые катодной поляризации двух образцов сплава Д16; кривые анодной поляризации и их линейная аппроксимация образцов: 2 – Cd/St3_{гальв}; 3 – Cd/St3_{IBAD}; 4 – Cd/12X18H9T_{гальв}; 5 – Cd/12X18H9T_{IBAD}; ○ – точки параметров контактной коррозии.

ной коррозии алюминия и сплава Д16 от двух до десяти раз по сравнению с их коррозией в контакте с исходными образцами Ст3 и 12Х18Н9Т. Слои, полученные осаждением цинка обоими методами, при контакте с алюминием и сплавом являются

анодами, вследствие чего коррозии подвергается не алюминий, а цинк.

Результаты ресурсных испытаний коррозии алюминия А7 и сплава Д16 в гальванических парах с углеродистой и нержавеющей сталями без покрытий и со слоями, сформированными методами ионно-ассистированного и гальванического осаждения цинка и кадмия, проведенных методом погружения в раствор 3% NaCl + 0.1% H₂O₂, обобщены на рис. 6. Скорость контактной коррозии сплава выше, чем алюминия. Наибольшая скорость коррозии отмечается для сплава Д16 при контакте со сталью Ст3 (1.7 г/(см² · год)). Гальваническое осаждение на стальные подложки цинка и кадмия приводит к существенному снижению скорости контактной коррозии алюминия и сплава от двух до 30 раз. Причем осаждение цинка лучше защищает от контактной коррозии алюминий, тогда как скорость контактной коррозии сплава Д16 меньше при осаждении на стали кадмиевых покрытий.

Ионно-ассистированное осаждение цинка и кадмия на стали, несмотря на меньшую толщину получаемых многокомпонентных слоев (50–80 нм против 10 мкм в случае гальванических покрытий), также приводит к снижению скорости контактной коррозии алюминия и сплава Д16. Наибольшее снижение скорости коррозии (в два–три раза) имеет место при осаждении цинка и кадмия на нержавеющую сталь, тогда как при осаждении металлов на сталь Ст3 снижение скорости коррозии составляет лишь около 10%.

Таблица 3. Значения потенциала и плотности тока коррозии в 3%-растворе NaCl алюминия и сплава Д16 при контакте с исследуемыми образцами

Образец	Алюминий А7		Сплав Д16	
	$U_{\text{кор}}$, мВ	$j_{\text{кор}}$, mA/cm ²	$U_{\text{кор}}$, мВ	$j_{\text{кор}}$, mA/cm ²
Ст3	-540	1.2×10^{-2}	-620	1.9×10^{-2}
12Х18Н9Т	-544	1.1×10^{-2}	-621	1.8×10^{-2}
Al/Ct3 _{IBAD}	-580	1.7×10^{-3}	-655	2.8×10^{-3}
Al/12X18H9T _{IBAD}	-590	1.2×10^{-3}	-660	2.0×10^{-3}
Zn/Ct3 _{IBAD}	-980	1.4×10^{-2}	-977	2.3×10^{-2}
Zn/12X18H9T _{IBAD}	-968	1.4×10^{-2}	-962	2.2×10^{-2}
Cd/Ct3 _{IBAD}	-682	3.7×10^{-3}	-674	6.7×10^{-3}
Cd/12X18H9T _{IBAD}	-768	3.9×10^{-3}	-760	1.0×10^{-2}
Zn/Ct3 _{galv}	-979	1.4×10^{-2}	-976	2.3×10^{-2}
Zn/12X18H9T _{galv}	-966	1.4×10^{-2}	-958	2.2×10^{-2}
Cd/Ct3 _{galv}	-685	2.6×10^{-3}	-681	4.4×10^{-3}
Cd/12X18H9T _{galv}	-774	1.5×10^{-3}	-768	1.0×10^{-2}

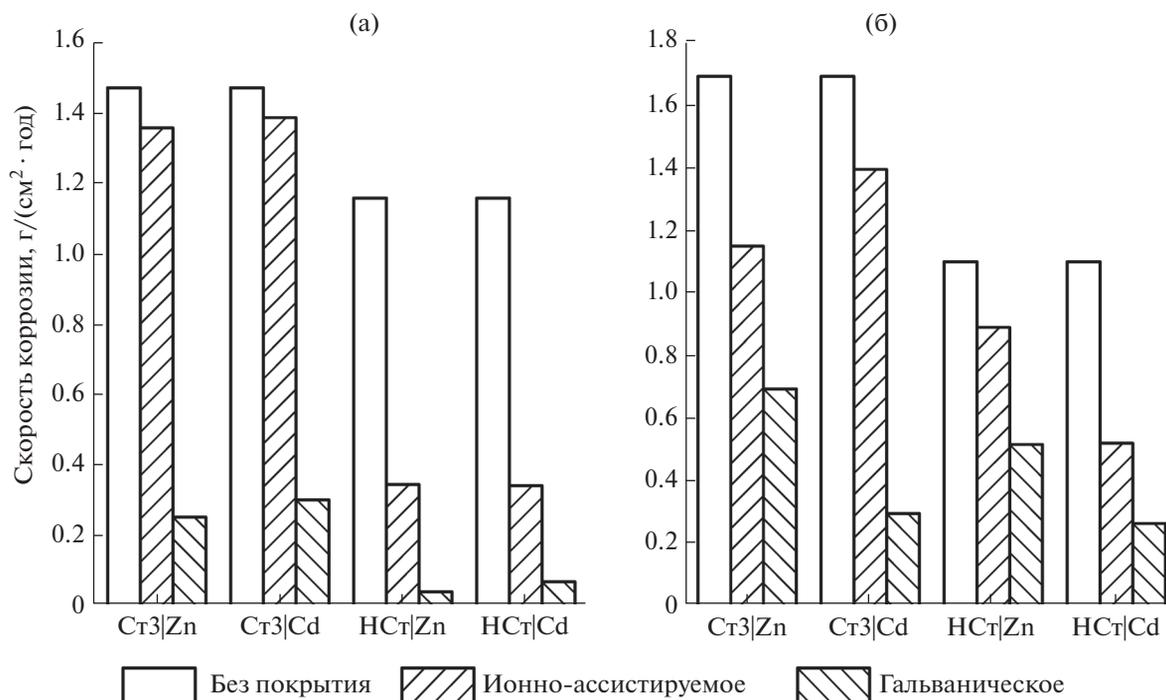


Рис. 6. Скорость коррозии в растворе 3% NaCl + 0.1% H₂O₂ алюминия А7 (а) и сплава Д16 (б) в гальванических парах со сталью Ст3 и нержавеющей сталью без покрытий и со слоями, сформированными ионно-ассистируемым и гальваническим осаждением цинка и кадмия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Защитные слои на поверхности углеродистой и нержавеющей сталей сформированы ионно-ассистируемым осаждением кадмия, цинка и алюминия из плазмы вакуумного дугового разряда импульсного ионного источника в режиме, при котором металл вводится в каталитический слой наноразмерного уровня в неравновесных условиях обработки ускоренными ионами осаждаемого металла.

Экспериментально методами электронно-зондового микроанализа и спектрометрии резерфордского обратного рассеяния установлено, что в состав слоев, формируемых ионно-ассистируемым осаждением металлов, входят атомы осаждаемого металла (Cd, Zn или Al), стальной подложки, кислорода и углерода. Толщина формируемых многокомпонентных слоев составляет 50–80 нм. Содержание осажденного металла в них $(1.0–3.5) \times 10^{17}$ ат./см². Их концентрация в максимуме распределения, расположенном на глубине 13–25 нм, 45–80 ат. %. Атомы элементов, входящих в состав слоев, распределены по поверхности практически равномерно за исключением попадающих из дугового разряда источника капель металла размером несколько микрометров.

Показана целесообразность применения вакуумного осаждения металлов при формировании

на поверхности сталей слоев, ослабляющих интенсивность коррозии алюминия и алюминиевого сплава при контакте со стальными деталями. Осаждение наиболее подходящих для этой цели кадмиевых и цинковых покрытий гальваническим методом сопряжено с серьезными экологическими и техническими проблемами. Так, гальваническое кадмирование в настоящее время практически повсеместно запрещено ввиду высокой токсичности как самого металлического кадмия, так и его ионов, образующихся в сточных водах и других отходах гальванического осаждения. Осаждение алюминия из водных растворов невозможно.

Коррозионные характеристики образцов сталей со слоями, сформированными ионно-ассистируемым осаждением кадмия, цинка и алюминия в предложенном режиме, сходны с характеристиками сталей с покрытиями, полученными гальваническим осаждением металлов. С учетом малой толщины формируемых многокомпонентных слоев (50–80 нм против 10 мкм в случае гальванических покрытий) можно заключить, что ионно-ассистируемое осаждение металлов оказывает существенное влияние на скорость контактной коррозии алюминия и алюминиевого сплава. В сравнении с гальваническим вакуумное ионно-ассистируемое осаждение отличается простотой подготовки поверхности подложек, одно-

стадийностью, экологической безопасностью и экономичностью.

Работа выполнена в рамках Государственной программы научных исследований Республики Беларусь “Гальванические технологии и оборудование”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГОСТ 9.005-72. Допустимые и недопустимые контакты металлов. М.: Изд-во стандартов, 1989. 22 с.
- Enders B., Knauf S., Wolf G.K. // Surf. Coat. Technol. 1994. V. 65. № 1–3. P. 203.
- Navinsek B., Panjan P., Milosev I. // Surf. Coat. Technol. 1999. V. 116–119. P. 476.
- Poplavsky V.V., Matys V.G. // Proceed. Int. Congr. Energy Fluxes and Rad. Effects. Tomsk: Publishing House of IAO SB RAS, 2014. P. 297.
- Поплавский В.В., Мищенко Т.С., Матыс В.Г. // Журн. теор. физики. 2010. Т. 80. С. 138.
- Фокин М.Н., Жигалова К.А. Методы коррозионных испытаний металлов. М.: Металлургия, 1986. 80 с.
- Zhang X.G. // Uhlig's Corrosion Handbook / Ed. Winston R.R. John Wiley & Sons, Inc, 2011. P. 123.
- ГОСТ 9.913-90. Единая система защиты от коррозии и старения. Алюминий, магний и их сплавы. Методы ускоренных коррозионных испытаний. М.: Изд-во стандартов, 1992. 9 с.
- Ильин В.А. Цинкование, кадмирование, оловянирование и свинцевание: библиотечка гальванотехника. Вып. 2 / Ред. Вячеславов В.М. Л.: Машиностроение, 1983. 87 с.
- Дасоян М.А., Пальмская И.Я., Сахарова Е.В. Технология электрохимических производств: учебник. Л.: Машиностроение, 1989. 391 с.
- Осинов В.А., Саблев П.П., Ступак Р.И. и др. // Приборы и техника эксперимента. 1978. № 6. С. 173.

Study of Composition and Properties of Protective Layers Formed on the Surface of Steels by Ion-Beam Assisted Deposition of Cadmium, Zinc, and Aluminum

V. V. Poplavsky, A. V. Dorozhko, V. G. Matys

Layers formed by ion-beam assisted deposition of cadmium, zinc, and aluminum on the surface of carbon and stainless steels were investigated with the aim to protect the aluminum and its alloys contacting with the steel parts against corrosion. The protective layers were formed in this mode of ion-beam assisted deposition, this the metal deposition and mixing of the deposited layer with the substrate surface atoms by accelerated ($U = 5$ kV) ions of the same metal were formed out of neutral fraction of steam and vacuum arc discharge plasma of the pulsed ion source. The morphology and composition of the obtained surface layers were studied by the scanning electron microscopy, electron probe microanalysis, and Rutherford backscattering spectrometry. It was found that the composition of layers include atoms of the deposited metal, the substrate material, as well as oxygen, and carbon. The layer thickness was found to be ~ 50 – 80 nm, the content of the deposited metal in the layers was $\sim (1.0$ – $3.5) \times 10^{17}$ atom/cm². The examination of corrosion of aluminum and its alloy contacting with the investigated materials confirmed the efficiency of the ion-beam modification of the surface of steel.

Сдано в набор 18.04.2016 г. Подписано к печати 15.07.2016 г. Дата выхода в свет 25.09.2016 г. Формат бумаги 60 × 88¹/₈
 Цифровая печать Усл. печ. л. 14.0 Усл. кр.-отг. 1.9 тыс. Уч.-изд. л. 14.0 Бум. л. 7.0
 Тираж 130 экз. Зак. 540 Цена свободная

Учредители: Российская академия наук, Институт физики твердого тела РАН

Издатель: Российская академия наук. Издательство “Наука”, 117997 Москва, Профсоюзная ул., 90
 Оригинал-макет подготовлен МАИК “Наука/Интерпериодика”
 Отпечатано в ППП “Типография “Наука”, 121099 Москва, Шубинский пер., 6