

УДК 621.793:620.197

В. Г. Матыс, В. В. Поплавский

Белорусский государственный технологический университет

**УСТОЙЧИВОСТЬ АЛЮМИНИЯ И ЕГО СПЛАВА
К КОНТАКТНОЙ КОРРОЗИИ В ГАЛЬВАНОПАРАХ СО СТАЛЯМИ
С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ПОКРЫТИЯМИ**

Цель работы – сопоставление коррозионной устойчивости алюминия и его сплава Д16 к контактной коррозии в гальванопарах с углеродистой сталью Ст3 и нержавеющей сталью 12Х18Н9Т, на поверхность которых нанесены различные металлические покрытия. В качестве металлов для нанесения покрытий на сталь использовались цинк, кадмий и алюминий. Покрытия наносились методами гальванического и вакуумного ионно-лучевого асистируемого осаждения. Исследование гальванической совместимости сформированных покрытий с алюминием и его сплавом проведено электрохимическими методами в 3%-м растворе NaCl.

Цинковые и кадмиевые покрытия на сталях, сформированные обоими методами, обладают электрохимическими характеристиками осаждаемых металлов. Цинковые покрытия в гальванопарах с алюминием и его сплавом являются анодами, а алюминиевые покрытия – катодами. Компромиссные потенциалы кадмиевых покрытий приблизительно совпадали с таковыми для алюминия и его сплава.

Плотность тока контактной коррозии алюминия и его сплава в гальванопарах со сталями без покрытий составляла $\sim 10^{-2}$ мА/см², а в гальванопарах с алюминиевыми покрытиями на сталях – $\sim 10^{-3}$ мА/см². Плотность тока коррозии цинка в покрытиях составляла $2 \cdot 10^{-2}$ мА/см², а кадмия – $6 \cdot 10^{-3}$ мА/см². Наилучшей гальванической совместимостью с алюминием и его сплавом Д16 в 3%-м растворе NaCl обладают кадмиевые покрытия.

Ключевые слова: алюминий, сплав, сталь, коррозия, осаждение, цинк, кадмий.

V. G. Matys, V. V. Poplavsky

Belarusian State Technological University

**GALVANIC CORROSION RESISTANCE OF ALUMINUM AND ITS ALLOY
IN GALVANIC COUPLES WITH STEELS WITH METALLIC COATINGS**

The aim of this work is comparison of corrosion resistance of aluminum and its alloy 2024 to galvanic corrosion in couples with carbon steel A284 and stainless steel type 321, on the surface of which various metallic coatings were deposited. Zinc, cadmium and aluminum used as the metal coatings on the steel. Coatings deposited by electroplating and vacuum ion-beam assisted deposition. Study of galvanic coupling of deposited coatings with aluminum and its alloy carried out by electrochemical methods in a 3% NaCl solution.

Zinc and cadmium coatings on steel, formed by both methods, have electrochemical characteristics of deposited metals. Zinc coatings in galvanic couples with aluminum and its alloy are anodes and aluminum coatings are cathodes. Compromise potentials of cadmium coatings approximately coincide with those for aluminum and its alloy.

Current density of the galvanic corrosion of aluminum and its alloy in galvanic couples with steel without coatings was $\sim 10^{-2}$ mA/cm², and in galvanic couples with aluminum coatings on steel – $\sim 10^{-3}$ mA/cm². Corrosion current density of zinc in coatings was $2 \cdot 10^{-2}$ mA/cm², and cadmium – $6 \cdot 10^{-3}$ mA/cm². Best galvanic compatibility with aluminum and its alloy 2024 in 3% NaCl have cadmium coatings.

Key words: aluminum, alloy, steel, corrosion, deposition, zinc, cadmium.

Введение. Алюминий и его сплавы в контакте со сталями могут подвергаться интенсивной коррозии вследствие возникновения коррозионного гальванического элемента, в котором алюминий, имея более отрицательный потенциал, чем сталь, является анодом. В частности, это имеет место при фиксации конструкций на основе алюминия с помощью стального крепежа в строительной отрасли [1, 2]. Контакт алюминиевых сплавов с различными сталями неиз-

бежно возникает в судостроении [3, 4] и в авиационном [5]. Одним из методов защиты алюминия и его сплавов от контактной коррозии является нанесение на стальные детали металлических покрытий, гальванически совместимых с алюминием [6]. Наиболее подходящими являются покрытия из кадмия и цинка, которые во многих условиях имеют близкие с алюминием электродные потенциалы. Гальванические методы осаждения таких покрытий представляют

серьезную экологическую опасность, особенно в случае кадмия. В этой связи целесообразно исследовать возможности применения вакуумных методов формирования покрытий [7–10], альтернативных гальваническому. Методами вакуумного осаждения можно нанести такие металлы, которые гальванически осадить невозможно или затруднительно. Например, алюминиевое покрытие на сталях будет обладать отличной гальванической совместимостью с деталями из алюминия и его сплавов. Однако гальваническое осаждение алюминия затруднительно, тогда как вакуумное осаждение алюминия [8, 9] ничем не отличается от осаждения других металлов.

Основная часть. В качестве объектов исследования выбраны алюминий марки А7, алюминиевый сплав Д16, углеродистая сталь Ст3 и нержавеющая сталь 12Х18Н9Т. Целью работы было сопоставление устойчивости к контактной коррозии алюминия и его сплава в гальванопарах со сталями, на поверхность которых осаждены цинк, кадмий и алюминий. Для осаждения металлов использованы методы гальванического осаждения и вакуумного ионно-ассистированного осаждения. Осаждение цинка и кадмия на поверхность сталей осуществлялось обоими методами, а осаждение алюминия – только вторым методом, поскольку из водных растворов гальваническое осаждение алюминия невозможно ввиду сильно отрицательного значения стандартного потенциала алюминия.

Электрохимическое осаждение кадмия проведено из аммиачного раствора [11], содержащего CdSO_4 , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ и H_3BO_3 , осаждение цинка – из щелочного раствора, включающего ZnO , NaOH и блескообразователь [12]. Осаждение покрытий проводилось при плотности тока 100 А/м^2 . Расчетная толщина покрытий составляла 12 мкм. Фактическая толщина покрытий была меньше и для разных образцов варьировалась около 10 мкм, что соответствует выходу по току осаждаемого металла ~ 80%. Полученные покрытия подвергались пассивации в растворе, содержащем Cr(III) [13]. Предварительно подложки подвергались механическому полированию и многостадийным процессам химического обезжиривания, травления, активации, как это принято в технологии гальванического осаждения покрытий [14]. Для приготовления растворов обезжиривания, травления, активации, электрохимического осаждения и пассивации использовались реактивы марки «хч» или «чда».

Вакуумное осаждение металлов проведено методом ионного ассистирования (IBAD – ion beam assisted deposition) в режиме, при котором осаждение металла и перемешивание осаждае-

мого слоя с атомами подложки ускоренным напряжением 5 кВ ионами того же металла осуществляются из нейтральной фракции пара и ионизированной плазмы вакуумного дугового разряда [15]. Подложки подвергались лишь механическому полированию и обезжириванию в этаноле.

Анализ слоев, получаемых ионно-лучевым ассистированным осаждением кадмия и цинка на сталях, методами электронно-зондового микроанализа и спектроскопии резерфордовского обратного рассеяния, показал, что в их состав входят атомы осаждаемого металла, материала подложки, а также примесей кислорода и углерода. По данным, полученным при обработке спектров резерфордовского обратного рассеяния, толщина модифицированных слоев составляет ~ 30–100 нм, а интегральное содержание атомов осаждаемых металлов на поверхности принимает значение ~ 10^{16} – 10^{17} см^{-2} .

Электрохимическая диагностика гальванической совместимости алюминия и его сплава Д16 со стальными образцами, а также скорости контактной коррозии проводилась путем регистрации компромиссных потенциалов и снятия поляризационных кривых в 3%-м растворе NaCl . Для регистрации компромиссных потенциалов и снятия поляризационных кривых использовался потенциостат IPC Pro MF, подключенный к персональному компьютеру с программным обеспечением «IPC2000». Электрохимические измерения проводились в стандартной трехэлектродной ячейке ЯСЭ-2. В качестве электрода сравнения использовался насыщенный хлорсеребряный электрод, а в качестве вспомогательного электрода – платиновая проволока. Регистрация компромиссных потенциалов осуществлялась в течение 20 мин после погружения образцов в раствор. Затем снималась поляризационная кривая в потенциодинамическом режиме при скорости развертки потенциала 1 мВ/с. Начальное значение потенциала выбиралось катоднее регистрируемого после 20-минутной выдержки компромиссного потенциала. Конечное значение потенциала поляризации образцов определялось по достижении анодной плотности тока в 10–40 мА/см^2 . Нерабочая часть поверхности образцов изолировалась нитролаком марки НИЦ-221. Геометрическая площадь неизолированной части поверхности образцов определялась по изображениям их поверхности, полученным с помощью сканера Mustek BearPaw 4800 TA II с высоким разрешением 1200 точек на дюйм. Для расчета площади поверхности использовалась программа ImageJ.

Значения компромиссного потенциала алюминия в 3%-м растворе NaCl варьировались от

–800 до –670 мВ, сплава Д16 – от –690 до –600 мВ. Для образца Ст3 стационарный потенциал варьировался от –470 до –420 мВ, а для стали Х18Н9Т – от –230 до –10 мВ. Таким образом, алюминий и его сплав Д16 в гальванопарах с углеродистой сталью Ст3 и нержавеющей сталью 12Х18Н9Т будут иметь отрицательный заряд, т. е. будут являться анодами в возникающем коррозионном гальваническом элементе и будут подвергаться растворению.

Компромиссный потенциал цинковых покрытий (рис. 1, а), полученных как гальваническим, так и ионно-лучевым ассистированным осаждением при ускоряющем напряжении, находится в диапазоне от –1000 до –960 мВ. Очевидно, что такие значения потенциала обусловлены цинком или точнее окислительно-восстановительными процессами с участием цинка и его поверхностных оксидных, гидроксидных и хлоридных соединений, образующихся при погружении образцов в 3%-й раствор NaCl. В коррозионном гальваническом элементе, составленном из образцов сталей с Zn покрытиями и алюминия или его сплава Д16, покрытия будут иметь отрицательный заряд, т. е. будут анодами и будут растворяться. Таким образом, цинк будет осуществлять протекторную защиту алюминия и его сплава до тех пор, пока сам не растворится.

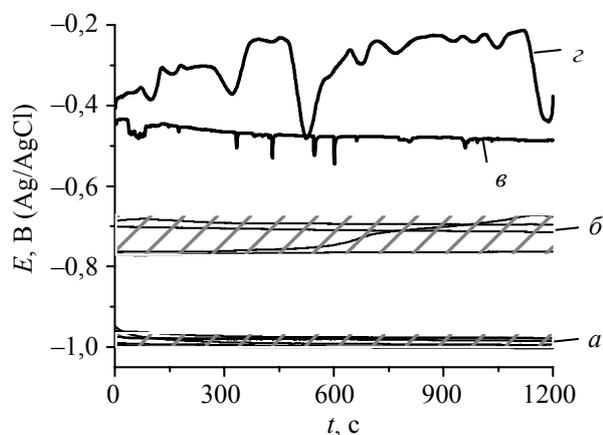


Рис. 1. Компромиссные потенциалы образцов сталей с Zn (а), Cd (б) и Al покрытиями на сталях Ст3 (в) и 12Х18Н9Т (з) в 3%-м растворе NaCl

Кадмиевое покрытие на сталях, полученное обоими методами (рис. 1, б), проявляет стационарный потенциал в диапазоне от –670 до –770 мВ, обусловленный химической природой кадмия. Значения стационарных потенциалов кадмиевых покрытий очень близки к стационарным потенциалам алюминия и его сплава, поэтому кадмиевые покрытия на сталях будут обладать очень хорошей гальванической совместимостью с алюминием и его сплавом Д16.

Компромиссные потенциалы алюминиевых покрытий на стальных образцах близки к стационарным потенциалам сталей. Так стационарный потенциал Al покрытия на стали Ст3 (рис. 1, в) варьировался от –490 до –440 мВ, что практически совпадает со стационарным потенциалом исходной стали Ст3. Стационарный потенциал Al покрытия на нержавеющей стали 12Х18Н9Т подвергался значительным колебаниям (рис. 1, з) и изменялся в диапазоне от –490 до –210 мВ, что приближается к нижней границе стационарных потенциалов исходной нержавеющей стали 12Х18Н9Т. Близость стационарных потенциалов Al покрытий на сталях к стационарным потенциалам подложки указывает на то, что Al покрытия, получаемые вакуумным ионно-ассистированным осаждением на стали Ст3 и 12Х18Н9Т, не являются сплошными. В коррозионных гальванических элементах, составленных из сталей Ст3 и 12Х18Н9Т с Al покрытиями, полученными ионно-лучевым ассистированным осаждением, и алюминия или сплава Д16, последние будут иметь отрицательный потенциал и, следовательно, будут выступать в роли анодов и будут растворяться.

В качестве меры скорости контактной коррозии использовались значения предельной плотности тока контактной коррозии, определенные по точкам пересечения анодных и катодных поляризационных кривых материалов, составляющих гальванопару (рис. 2). Поляризационные кривые при этом аппроксимировались прямыми линиями в полулогарифмических координатах.

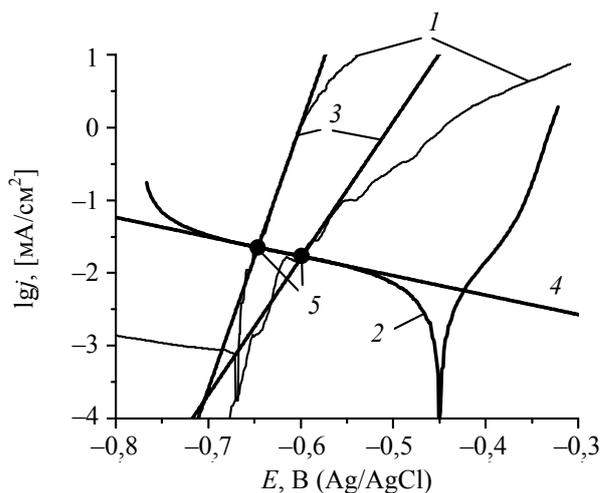


Рис. 2. Поляризационные кривые (ПК) образцов сплава Д16 (1), стали Ст3 (2); линейные аппроксимации анодных ПК сплава Д16 (3) и катодной ПК стали Ст3 (4); параметры коррозии (5) (3%-й раствор NaCl, 1 мВ/с)

Определяемую из поляризационных кривых величину плотности тока контактной коррозии называют также предельной плотностью тока

контактной коррозии [16], поскольку реальная плотность тока в коррозионном гальваническом элементе будет меньше из-за омических потерь напряжения в растворе электролита.

Определенные таким образом значения потенциалов и плотностей тока коррозии усреднялись для разных образцов одних и тех же материалов, составляющих гальванопару, и рассчитывалась интервальная оценка в виде радиуса доверительного интервала при доверительной вероятности 0,9. Значения полученных плотностей тока и потенциалов контактной коррозии алюминия в гальванопарах с исходными сталями и сталями с Al покрытиями представлены в табл. 1.

Таблица 1
Потенциалы ($E_{кор}$) и плотности тока контактной коррозии ($j_{кор}$) алюминия

Материал	$E_{кор}$, мВ	$lg j_{кор}$	$j_{кор}$, mA/cm^2
Ст3	-540 ± 340	$-1,93 \pm 0,92$	$1,2 \cdot 10^{-2}$
НС	-544 ± 39	$-1,95 \pm 0,22$	$1,1 \cdot 10^{-2}$
Ст3\Al	-580 ± 220	$-2,78 \pm 0,70$	$1,7 \cdot 10^{-3}$
НС\Al	-590 ± 210	$-2,93 \pm 0,66$	$1,2 \cdot 10^{-3}$

Примечание. НС – нержавеющая сталь 12Х18Н9Т.

В табл. 2 представлены параметры контактной коррозии сплава Д16 в гальванопарах с исходными сталями и сталями с Al покрытиями.

Таблица 2
Потенциалы ($E_{кор}$) и плотности тока контактной коррозии ($j_{кор}$) сплава Д16

Материал	$E_{кор}$, мВ	$lg j_{кор}$	$j_{кор}$, mA/cm^2
Ст3	-620 ± 40	$-1,72 \pm 0,10$	$1,9 \cdot 10^{-2}$
НС	-621 ± 12	$-1,75 \pm 0,11$	$1,8 \cdot 10^{-2}$
Ст3\Al	-655 ± 24	$-2,56 \pm 0,08$	$2,8 \cdot 10^{-3}$
НС\Al	-660 ± 21	$-2,70 \pm 0,07$	$2,0 \cdot 10^{-3}$

Ток на катодном участке кривой определяется реакцией катодного выделения водорода и/или восстановления молекулярного кислорода. Реакция выделения водорода становится термодинамически возможной при потенциалах отрицательнее равновесного потенциала водородного электрода, который зависит от pH раствора. В нейтральной среде, т. е. при $pH = 7$, равновесный потенциал выделения водорода составляет ~ -640 мВ относительно насыщенного хлорсеребряного электрода сравнения. Поэтому токи на катодных участках поляризационных кривых для образцов стали 12Х18Н9Т (рис. 3) при потенциалах больших -640 мВ скорее всего обусловлены восстановлением молекулярного кислорода, а при меньших по-

тенциалах – обеими реакциями. Поскольку содержание растворенного кислорода в растворе невелико ($\sim 10^{-4}$ моль/л [17]), то и предельная диффузионная плотность тока восстановления кислорода будет невелика (примерно 10^{-3} – 10^{-2} mA/cm^2). При достижении величины предельной диффузионной плотности тока на катодных участках поляризационных кривых ток не будет зависеть от потенциала. Так для образцов стали 12Х18Н9Т при достижении плотности тока соответствующей $lg j \sim -1,5$ ток перестает зависеть от потенциала (рис. 3). Это значит, что в этих условиях катодный процесс восстановления кислорода протекает в диффузионном режиме. Поэтому для определения параметров контактной коррозии этих образцов линейная аппроксимация не проводилась. Параметры контактной коррозии определялись по пересечению экспериментальных катодных поляризационных кривых стали с анодными кривыми алюминия. Как видно из табл. 1 и 2 средние значения плотности тока контактной коррозии алюминия и его сплава в гальванопарах со сталями Ст3 и 12Х18Н9Т примерно одинаковы и составляют $(1-2) \cdot 10^{-2}$ mA/cm^2 .

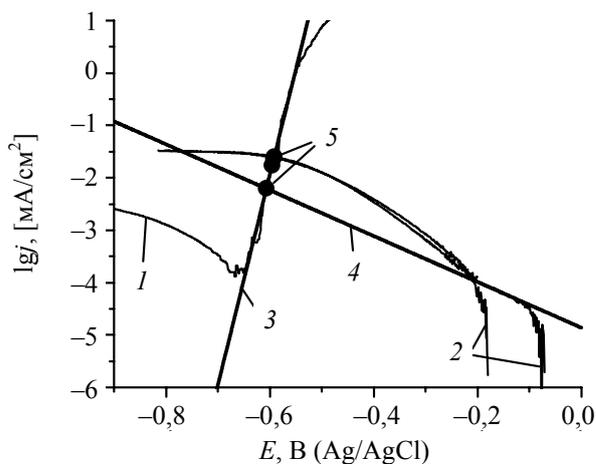


Рис. 3. Поляризационные кривые (ПК) образцов Al (1), стали 12Х18Н9Т (2); линейные аппроксимации анодных ПК Al (3) и катодной ПК стали (4); параметры коррозии (5) (3%-й раствор NaCl, 1 мВ/с)

Катодные участки поляризационных кривых для образцов сталей с Al покрытием, полученным вакуумным ионно-ассистированным осаждением, характеризуются малым наклоном, благодаря чему плотности тока контактной коррозии алюминия и сплава оказываются примерно на порядок меньше, чем в случае исходных сталей (табл. 1, 2). Это обусловлено более низкой каталитической активностью к реакции восстановления кислорода поверхности сталей с Al покрытием, чем исходных сталей.

Потенциалы коррозии алюминиевого сплава Д16 оказались примерно на 100 мВ меньше, чем алюминия. Это обусловлено более крутым ходом анодных поляризационных кривых для сплава Д16, чем для Al. Анодное растворение сплава Д16 происходит с большей скоростью, чем растворение Al. Это согласуется с меньшей коррозионной устойчивостью сплавов, содержащих медь, к которым относится также Д16, в растворах хлоридов [18]. Плотности тока контактной коррозии алюминия и сплава Д16 оказались примерно одинаковыми благодаря тому, что компромиссный потенциал алюминия немного меньше (примерно на 50 мВ), чем компромиссный потенциал сплава Д16.

Потенциалы контактной коррозии алюминиевого сплава Д16 в гальванопаре со сталями Ст3 и 12Х18Н9Т как исходными, так и после ионно-ассистируемого осаждения Al находятся в интервале от -600 до -680 мВ, что значительно ближе к компромиссному потенциалу сплава, чем к компромиссным потенциалам образцов сталей. В этом случае коррозионный процесс протекает с катодным контролем [19]. Лимитирующей стадией является диффузия молекулярного кислорода к поверхности катода, что особенно четко проявляется на поляризационных кривых для нержавеющих сталей, на которых четко обнаруживается площадка предельного диффузионного тока (рис. 3). В случае контактной коррозии алюминия с теми же образцами сталей средний потенциал коррозии примерно на 100 мВ больше, однако доверительный интервал очень широкий. Поэтому в данном случае нельзя исключить, что коррозионный процесс может протекать под смешанным анодно-катодным контролем, при котором скорость коррозии определяется как скоростью диффузии молекулярного кислорода к поверхности катода, так и скоростью анодного растворения алюминия. Смешанный анодно-катодный контроль характерен для коррозии пассивирующихся металлов [19], к которым относится и алюминий.

На рис. 4 приведены поляризационные кривые для образцов алюминия, его сплава Д16 и Cd покрытий, полученных разными методами на сталях. Из анализа этих кривых можно отметить, что потенциалы коррозии Cd покрытий всего лишь на несколько милливольт меньше потенциалов коррозии алюминия и его сплава, т. е. их потенциалы коррозии практически совпадают. Плотность тока коррозии Cd покрытий более, чем на порядок больше, чем плотность тока коррозии алюминия и его сплава Д16. В гальванопарах алюминия или его сплава с Cd покрытиями на сталях алюминий должен быть катодом, а Cd покрытие – анодом и растворяться

должен кадмий. Однако из-за незначительной разницы потенциалов и очень низких токов на катодной ветви поляризационных кривых для алюминия скорость контактной коррозии кадмия должна быть невелика, если сравнить ее со скоростью саморастворения кадмия, что и подтверждается данными табл. 3.

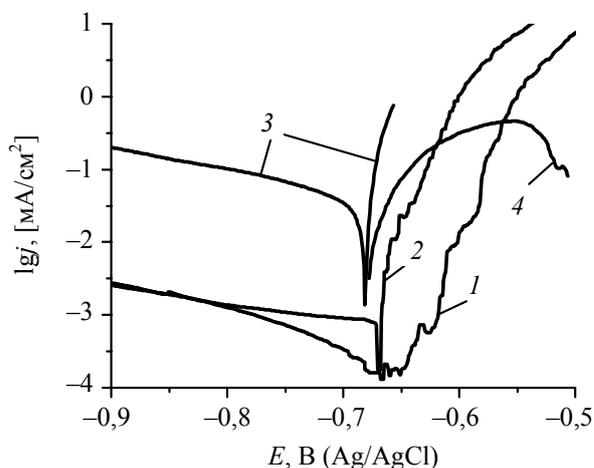


Рис. 4. Поляризационные кривые образцов алюминия (1), сплава Д16 (2) и Cd покрытий на стали Ст3, полученных гальваническим (3) и ионно-лучевым ассистируемым осаждением (4) (3%-й раствор NaCl, 1 мВ/с)

Таблица 3

Потенциалы ($E_{кор}$) и плотности тока коррозии ($j_{кор}$) Cd, усредненные по всем Cd покрытиям

Вид коррозии	$E_{кор}$, мВ	$lg j_{кор}$	$j_{кор}$, мА/см ²
Саморастворение	-750 ± 50	$-2,2 \pm 0,6$	$6 \cdot 10^{-3}$
Контактная коррозия с Al	-790 ± 20	$-2,8 \pm 0,2$	$2 \cdot 10^{-3}$
Контактная коррозия с Д16	-780 ± 20	$-2,6 \pm 0,2$	$3 \cdot 10^{-3}$

Поскольку образцы сталей с Cd покрытиями, полученными обоими методами, проявляют примерно одинаковый стационарный потенциал, характерный для кадмия, можно полагать, что и потенциалы, и плотности тока коррозии для образцов стали будут характерными для кадмия. Поэтому можно все потенциалы и плотности тока коррозии для образцов сталей с Cd покрытиями усреднить и получить характерные для кадмия значения. В табл. 3 приведены усредненные значения и 90%-е доверительные интервалы для потенциалов и плотностей тока саморастворения и контактной коррозии Cd покрытий. Как видно из табл. 3, скорость саморастворения Cd не меньше скорости контактной коррозии в гальванопарах с Al и его сплавом Д16.

Плотности тока и потенциалы коррозии Cd в случае саморастворения определялись как точки пересечения анодной и катодной поляризационных кривых Cd покрытий, а в случае контактной коррозии Cd – как точки пересечения анодных кривых Cd покрытия с катодными кривыми Al или его сплава Д16.

Zn покрытия на сталях в гальванопарах с Al и его сплавом будут являться анодами, скорость их коррозии должна быть выше, чем в отсутствие гальванопары. Но, поскольку катодные поляризационные кривые Al и его сплава (рис. 5) характеризуются малым наклоном и малыми токами, то скорость контактной коррозии Zn может быть меньше скорости его саморастворения, как в случае Cd покрытий.

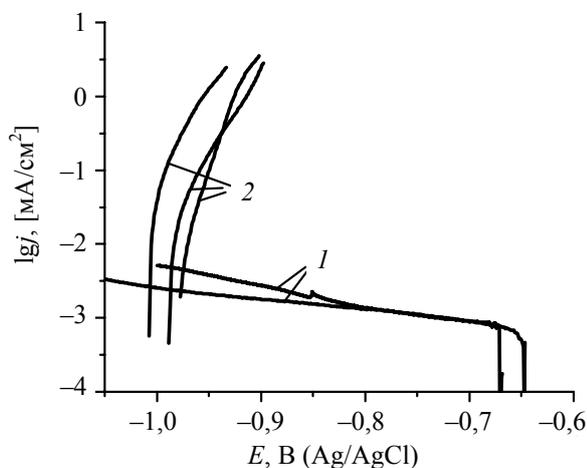


Рис. 5. Поляризационные кривые сплава Д16 (1) и Zn покрытий на сталях (2) (3%-й раствор NaCl; 1 мВ/с)

Усредненные по всем Zn покрытиям значения плотности тока саморастворения Zn оказались не меньше, чем плотности тока контактной коррозии в гальванопарах с Al и его сплавом Д16 (табл. 4). Такая же ситуация наблюдалась для Cd покрытий (табл. 3), однако скорость саморастворения Zn примерно в 30 раз меньше, чем скорость саморастворения Cd. Поэтому Cd покрытия на сталях будут предпочтительнее Zn для защиты от контактной коррозии Al и его сплавов в условиях коррозии с участием хлорид-ионов, например, в морском и приморском климатах.

Литература

1. Синявский В. С., Калинин В. Д. Коррозионная долговечность алюминиевых сплавов и коррозионностойких сталей в подконструкциях вентилируемых фасадов // Стройпрофиль. 2011. № 6. С. 27–28.
2. Жирнов А. Д., Каримова С. А., Головина В. М. Коррозионная стойкость и защита алюминиевых сплавов в строительных конструкциях // Стройпрофиль. 2010. № 2. С. 30–31.
3. Сорокин А. И. Исследование процесса разрушения алюминиевого сплава от контактной коррозии в высокоскоростном потоке морской воды // Вісник СевНТУ. Серія: Механіка, енергетика, екологія. 2012. Вип. 132. С. 135–141.

Таблица 4

Потенциалы ($E_{кор}$) и плотности тока коррозии ($j_{кор}$) Zn, усредненные по всем Zn покрытиям

Вид коррозии	$E_{кор}$, мВ	$\lg j_{кор}$	$j_{кор}$, мА/см ²
Саморастворение	-1010 ± 30	$-1,8 \pm 0,3$	$2 \cdot 10^{-2}$
Контактная коррозия с Al	-1012 ± 12	$-2,0 \pm 0,1$	$1 \cdot 10^{-2}$
Контактная коррозия с Д16	-1018 ± 14	$-2,1 \pm 0,1$	$8 \cdot 10^{-3}$

Заключение. Наибольшие значения плотности тока контактной коррозии (примерно $2 \cdot 10^{-2}$ мА/см²) наблюдались в парах алюминия и его сплава Д16 с исходными углеродистой и нержавеющей сталями (растворяется алюминий или его сплав Д16). Наименьшие значения плотности тока контактной коррозии (примерно 10^{-3} мА/см²) наблюдались в парах алюминия и его сплава Д16 с Al покрытиями на сталях, сформированными вакуумным ионно-лучевым ассистируемым осаждением. Цинковые и кадмиевые покрытия на сталях, полученные обоими методами, проявляют компромиссный потенциал, который характерен для металла покрытия и скорость саморастворения, не превышающую скорости контактной коррозии в гальванопарах с алюминием и сплавом Д16, в которых эти покрытия являются анодами. Скорость саморастворения кадмия (плотность тока коррозии $6 \cdot 10^{-3}$ мА/см²) примерно в три раза меньше скорости саморастворения цинка ($2 \cdot 10^{-2}$ мА/см²) в 3%-м растворе NaCl. Характер анодных и катодных поляризационных кривых указывает на то, что контактная коррозия сплава Д16 протекает с катодным контролем, тогда как для контактной коррозии алюминия нельзя исключить смешанного анодно-катодного контроля, особенно в случае, когда алюминий образует гальванопару с углеродистой сталью Ст3. Преимущество ионно-лучевого ассистируемого метода перед гальваническим заключается в возможности осаждения на поверхность стали алюминия и получения покрытия, которое может обладать идеальной гальванической совместимостью с алюминием и его сплавами.

4. Стогний Г. В. Перспективы исследования контактной коррозии металлов в современном корабле- и судостроении // Водный транспорт. 2013. № 2. С. 43–51.
5. Findlay S. J., Harrison N. D. Why aircraft fail // *Materials Today*. 2002. Issue 11. P. 18–25.
6. ГОСТ 9.005–72. Допустимые и недопустимые контакты металлов. М.: Изд-во стандартов, 1989. 22 с.
7. Navinsek B., Panjan P., Milosev I. PVD coatings as an environmentally clean alternative to electroplating and electroless processes // *Surface and Coatings Technology*. 1999. Vol. 116–119. P. 476–487.
8. Enders B., Knauß S., Wolf G. K. Corrosion properties of aluminum based alloys deposited by ion beam assisted deposition // *Surface and Coatings Technology*. 1994. Vol. 65. P. 203–207.
9. Jianming X., Weijianga Z., Wolf G. K. The corrosion properties of Al/Al₂O₃ multilayered coatings on CK45 steel deposited by IBAD // *Surface and Coatings Technology*. 2004. Vol. 187. P. 194–198.
10. Chao L.-C., Lin C.-F., Liao C.-C. Effect of surface morphology of metallic zinc films deposited by ion beam sputter deposition on the formation of ZnO nanowires // *Vacuum*. 2011. Vol. 86. P. 295–298.
11. Ильин В. А. Цинкование, кадмирование, оловянирование и свинцевание: библиотечка гальванотехника. Вып. 2. Л.: Машиностроение, 1983. 87 с.
12. Процесс слабокислого цинкования. ООО «Химсинтез». [Электронный ресурс]. 2014. Режим доступа: <http://chimsn.ru/bleskoobrazovately-dlya-galvanotekhniki/process-slabokislogo-cinkovaniya>. Дата доступа: 23.12.2014.
13. Oshima K., Tanaka S., Inoue M., Yamamoto T. Processing solution for forming hexavalent chromium free and corrosion resistant conversion film on zinc or zinc alloy plating layers, hexavalent chromium free and corrosion resistant conversion film, method for forming the same. Patent US. no. 7745008, 2006.
14. Дасоян М. А., Пальмская И. Я., Сахарова Е. В. Технология электрохимических производств. Л.: Машиностроение, 1989. 391 с.
15. Разработка альтернативного гальваническому ресурсосберегающего метода получения наноразмерных защитных коррозионно-стойких покрытий посредством ионно-ассистируемого осаждения металлов: отчет о НИР (заключ.) / Белорусский гос. технологич. ун-т; рук. темы В. В. Поплавский. Минск, 2013. 55 с.
16. Zhang X. G. Galvanic corrosion // *Uhlig's Corrosion Handbook*. Ed. R. Winston Revie. 3rd Edition. John Wiley & Sons, Inc. P. 123–143.
17. Дамаскин Б. Б., Петрий О. А., Цирлина Г. А. Электрохимия. М.: Химия, 2001. 624 с.
18. Синявский В. С., Вальков В. Д., Калинин В. Д. Коррозия и защита алюминиевых сплавов. М.: Металлургия, 1986. 368 с.
19. Семенова И. В., Флорианович Г. М., Хорошилов А. В. Коррозия и защита от коррозии. М.: Физматлит, 2002. 336 с.

References

1. Sinyavskiy V. S., Kalinin V. D. Corrosion durability of aluminum alloys and corrosion-resistant steels in the substructures of ventilated facades. *Stroyprofil* [Build. profile], 2011, no. 6, pp. 27–28 (in Russian).
2. Zhirnov A. D., Karimova S. A., Golovina V. M. Corrosion resistance and protection of aluminum alloy in building structures. *Stroyprofil* [Build. profile], 2010, no. 2, pp. 30–31 (in Russian).
3. Sorokin A. I. Study of the destruction process of aluminum alloy from galvanic corrosion in high speed flow of sea water. *Visnik Sevntu. Seriya: Mehanika, energetika, ekologiya* [Bulletin of the Sevastopol National Technical University], 2012, vol. 132, pp. 135–141 (in Russian).
4. Stogniy G. V. Perspectives of research galvanic corrosion of metals in a modern boat-and shipbuilding. *Vodnyy transport* [Water transport], 2013, no. 2, pp. 43–51 (in Russian).
5. Findlay S. J., Harrison N. D. Why aircraft fail. *Materials Today*, 2002, issue 11, pp. 18–25.
6. GOST 9.005–72. Valid and invalid contacts of metals. Moscow, Izdatelstvo standartov Publ., 1989, 22 p. (in Russian).
7. Navinsek B., Panjan P., Milosev I. PVD coatings as an environmentally clean alternative to electroplating and electroless processes. *Surface and Coatings Technology*, 1999, vol. 116–119, pp. 476–487.
8. Enders B., Knauß S., Wolf G. K. Corrosion properties of aluminum based alloys deposited by ion beam assisted deposition. *Surface and Coatings Technology*, 1994, vol. 65, pp. 203–207.
9. Jianming X., Weijianga Z., Wolf G. K. The corrosion properties of Al/Al₂O₃ multilayered coatings on CK45 steel deposited by IBAD. *Surface and Coatings Technology*, 2004, vol. 187, pp. 194–198.
10. Chao L.-C., Lin C.-F., Liao C.-C. Effect of surface morphology of metallic zinc films deposited by ion beam sputter deposition on the formation of ZnO nanowires. *Vacuum*, 2011, vol. 86, pp. 295–298.

11. Ilyin V. A. Zinc plating, cadmium plating, tin plating and lead plating: library of electroplating. Issue 2. Leningrad. Mashinostroenie, 1983. 87 p. (in Russian).
12. Weak Acid Zinc Plating. ООО «Himsintez». [Co. Ltd «Himsintez»]. Available at: <http://chimsn.ru/bleskoobrazovatelyi-dlya-galvanotekhniki/process-slabokislogo-cinkovaniya>. (accessed 23.12.2014).
13. Oshima K., Tanaka S., Inoue M., Yamamoto T. Processing solution for forming hexavalent chromium free and corrosion resistant conversion film on zinc or zinc alloy plating layers, hexavalent chromium free and corrosion resistant conversion film, method for forming the same. Patent US. no. 7745008, 2006.
14. Dasoyan M. A., Pal'mskaya I. Y., Sakharova E. V. *Tekhnologiya elektrokhimicheskikh proizvodstv* [Technology of electrochemical production]. Leningrad, Mashinostroenie, 1989. 391 p. (in Russian).
15. *Razrabotka al'ternativnogo gal'vanicheskogo resursosberegayushchego metoda polucheniya nanorazmernykh zashchitnykh korroziionno-stoykikh pokrytiy posredstvom ionno-assistiruemogo osazhdeniya metallov: otchet o NIR (zaklyuch.)* [Development of alternative methods for nanoscale galvanic protective corrosion-resistant coatings by ion-beam assisted deposition of metals: a research report (final)]. Minsk, 2013, 55 p. (in Russian).
16. Zhang X. G. Galvanic corrosion. Uhlig's Corrosion Handbook. Ed. R. Winston Revie. 3rd Edition. John Wiley & Sons, Inc. pp. 123–143.
17. Damaskin B. B., Petrij O. A., Tsirlina G. A. *Elektrokimiya* [Electrochemistry]. Moscow, Himiya, 2001. 624 p. (in Russian).
18. Sinyavskiy V. S., Val'kov V. D., Kalinin V. D. *Korroziya i zashchita alyuminievykh splavov* [Corrosion and protection of aluminum alloys]. Moscow, Metallurgiya, 1986. 368 p. (in Russian).
19. Semenova I. V., Florianovich G. M., Khoroshilov A. V. *Korroziya i zashchita ot korrozii* [Corrosion and corrosion protection]. Moscow, Physmatlit, 2002. 336 p. (in Russian).

Информация об авторах

Матыс Владимир Генрихович – кандидат химических наук, доцент кафедры химии, технологии электрохимических производств и материалов электронной техники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: vmatys@belstu.by

Поплавский Василий Владимирович – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры физики. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: vpoplav@yandex.by

Information about the authors

Matys Vladimir Genrihovich – Ph. D. Chemistry, assistant professor, Department of Chemistry, Technology of Electrochemical Industry and Materials of Electronic Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vmatys@belstu.by

Poplavsky Vasiliy Vladimirovich – Ph. D. Physics and Mathematics, assistant professor, assistant professor, Department of Physics. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vpoplav@belstu.by

Поступила 18.02.2015