

УДК 69:620.193/.197
ГРНТИ 67.01.97
ВАК 05.17.03
DOI 10.24412/2409-3203-2021-25-60-70

К ВОПРОСУ О ЗАЩИТЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ ОТ КОНТАКТНОЙ КОРРОЗИИ МЕТАЛЛОВ

Гиннэ Светлана Викторовна

к.п.н., доцент кафедры технологии композиционных материалов и древесиноведения
ФГБОУ ВО Сибирский государственный университет науки и технологий имени
академика М.Ф. Решетнёва
Россия, г. Красноярск

Аннотация: Исследование посвящено выявлению, обоснованию и описанию наиболее продуктивных методов защиты строительных машин и оборудования от контактной коррозии металлов. Первая группа методов предотвращения и уменьшения разрушения строительных машин и оборудования от контактной коррозии металлов включает в себя мероприятия, которые снижают эффективность работы электронных пар, образованных в результате соприкосновения разнородных металлических материалов: правильный выбор металлических материалов, рациональные методы конструирования, электрохимическая защита. Вторая группа методов предотвращения и уменьшения разрушения строительных машин и оборудования от контактной коррозии металлов объединяет мероприятия, направленные на изменение свойств коррозионной (рабочей) среды. Самым действенным методом защиты строительных машин и оборудования от контактной коррозии металлов посредством изменения свойств коррозионной (рабочей) среды является ингибиторная защита. Третья группа методов предотвращения и уменьшения разрушения строительных машин и оборудования от контактной коррозии металлов охватывает мероприятия, которые способствуют повышению коррозионной стойкости металлических материалов, применяемых для изготовления соприкасающихся элементов (деталей) данного вида технических объектов: пассивация металлов, легирование металлов и сплавов, использование защитных покрытий.

Ключевые слова: контактная коррозия металлов, методы защиты строительных машин и оборудования от контактной коррозии металлов.

TO THE QUESTION ABOUT OF PROTECTION OF CONSTRUCTION MACHINES AND EQUIPMENT FROM CONTACT CORROSION OF METALS

Ginne Svetlana Viktorovna

PhD, Associate Professor of the branch of technology of composite materials and wood science
of the Reshetnev Siberian State University of science and technologies
Russia, Krasnoyarsk

Abstract: The study is devoted to the identification, justification and description of the most productive methods of protection of construction machines and equipment from contact corrosion of metals. The first group of methods for preventing and decreasing the destruction of construction machines and equipment from contact corrosion of metals includes measures that reduce the efficiency of electronic pairs, which are formed as a result of contact of dissimilar metal materials: the correct choice of metal materials, rational design methods, electrochemical protection. The second group of methods for preventing and decreasing the destruction of construction machines and equipment from contact corrosion of metals combines measures, aimed at changing the properties of the corrosive (working) environment. The inhibitory

protection is the most effective method of protection of construction machines and equipment from contact corrosion of metals by changing the properties of the corrosive (working) environment. The third group of methods for preventing and decreasing the destruction of construction machines and equipment from contact corrosion of metals covers measures that contribute to improving the corrosion resistance of metal materials used for the manufacture of contacting elements (details) of this type of technical objects: passivation of metals, alloying of metals and alloys, use of protective coatings

Keywords: contact corrosion of metals, methods of protection of construction machines and equipment from contact corrosion of metals.

В последнее время эксплуатационные требования к строительным машинам и оборудованию повышаются, что вызывает необходимость использования большого количества различного типа металлических материалов при производстве обозначенных технических объектов, приводящее к возникновению одного из опаснейших видов коррозии металлов – контактной (биметаллической) коррозии – электрохимической коррозии, вызываемой контактом двух и более металлов (сплавов), которые имеют различные электродные потенциалы и другие электрохимические свойства в данной коррозионной (рабочей) среде [1], [2], [3], [4], [5]. Не смотря на давность изучения и множество проведённых исследований в сфере противокоррозионной защиты металлоизделий, проблема защиты строительных машин и оборудования от контактной коррозии металлов не теряет своей актуальности вследствие непрерывного роста её интегрального объёма и ужесточения требований к качеству (и, прежде всего, к надёжности) данных технических объектов. Целью нашей работы является выявление, обоснование и описание наиболее продуктивных методов защиты строительных машин и оборудования от контактной коррозии на основе информационно-аналитического обзора прогрессивных научно-технических решений в области защиты металлов от коррозии.

Целенаправленный отбор теоретического материала и проведённый анализ научных трудов, посвящённых изучению, разработке и совершенствованию способов борьбы с коррозией металлов, позволили нам выделить три основных группы методов защиты строительных машин и оборудования от контактной коррозии металлов: 1) методы, снижающие эффективность работы электронных пар, которые образуются при соприкосновении разнородных металлических материалов; 2) методы, направленные на изменение свойств коррозионной (рабочей) среды; 3) методы, способствующие повышению коррозионной стойкости металлических материалов, которые используются для изготовления строительных машин и оборудования.

Первая группа методов предотвращения и уменьшения разрушения строительных машин и оборудования от контактной коррозии металлов включает в себя мероприятия, которые снижают эффективность работы электронных пар, образованных в результате соприкосновения разнородных металлических материалов: правильный выбор металлических материалов, рациональные методы конструирования, электрохимическая защита.

Правильный (рациональный) выбор металлических материалов для изготовления элементов (деталей) строительных машин и оборудования предполагает подбор контактирующих металлов и сплавов с минимальной разницей потенциалов, т.е. соприкасающиеся металлические материалы должны по возможности иметь наименьшую разность стационарных потенциалов в эксплуатационных условиях [6], [7], [8], [9]. Другими словами, оценку и выбор металлических материалов для изготовления отдельных элементов (деталей) строительных машин и оборудования желательно производить с учётом потенциалов соприкасающихся металлов, т.е. при анализе электрохимической коррозии, протекающей при взаимодействии двух разнородных металлов, с точки зрения теории гальванических элементов следует учитывать контактную разность потенциалов между ними. В частности, нельзя без соответствующей

изоляции контактирующих поверхностей элементов (деталей) строительных машин и оборудования сочетать металлические материалы, существенно отличающиеся по величине потенциалов, поскольку при контакте таких материалов контактная коррозия значительно усиливается вследствие образования коррозионного макрогальванического элемента между соприкасающимися металлическими поверхностями. Как показывают результаты эмпирических наблюдений, сила тока подобных коррозионных элементов, а, следовательно, и скорость их коррозии зависит от разности потенциалов контактирующих металлов: более активный металл разрушается при прочих равных условиях тем быстрее, чем больше разность потенциалов соприкасающихся металлов. В ходе промышленных испытаний было обнаружено, что более интенсивной коррозии подвержены те элементы (детали) строительных машин и оборудования, которые изготовлены из активных металлов с большими электроотрицательными потенциалами, а коррозия элементов (деталей) из металлов с более положительными потенциалами резко замедляется или полностью прекращается.

По мнению Н.М. Хохлачёвой, Е.В. Ряховской и Т.Г. Романовой, учёт контактной разности потенциалов металлических материалов особенно актуален, если участок поверхности, где происходит соприкосновение этих материалов, взаимодействует с коррозионной (рабочей) средой. Изучая данный метод защиты металлов от контактной коррозии, другие эксперты отмечают, что в зависимости от природы коррозионной (рабочей) среды металлы принято подразделять на группы, в пределах которых возможны их контакты друг с другом, поскольку они имеют близкие значения стационарных потенциалов [6], [9], [10]. На основании опыта эксплуатации металлов и сплавов в естественных условиях и лабораторных исследований в разных коррозионных средах (морская вода, хлорид натрия и другие) учёные по значению стационарных потенциалов выявили пять групп сочетаний металлических материалов, относительно безопасных в отношении контактной коррозии: I группа – магний и его сплавы, цинк; II группа – кадмий, цинк, алюминий и его сплавы; III группа – свинец, олово, железо и стали перлитного класса; IV группа – никель, хром, кобальт, нержавеющие стали, медь и её сплавы (латуни, бронзы), медноникелевые сплавы; V группа – титан и его сплавы, коррозионно-стойкие стали, серебро, золото, платина [4], [7], [10].

Рациональные методы конструирования строительных машин и оборудования направлены на максимально возможное исключение или замедление контактной коррозии металлов [6], [7], [11]. Одним из таких методов является разработка конфигурации (формы) элементов (деталей) строительных машин и оборудования, не препятствующей удалению влаги в местах их соприкосновения друг с другом. Как отмечают специалисты, зачастую строительные машины и оборудование состоят из элементов (деталей) такой конфигурации, которая приводит к концентрации влаги в зоне их соединения, а соответственно и к повышению контактной коррозии металлов. Для устранения данной проблемы исследователи предлагают на этапе конструирования строительных машин и оборудования разрабатывать такую конфигурацию их элементов (деталей), которая естественным путём будет способствовать удалению влаги из зоны контакта металлов. Решение поставленной задачи, например, может быть осуществлено посредством придания соприкасающимся элементам (деталям) строительных машин и оборудования выпуклой (сферической) формы. В процессе проведённого эксперимента учёными было установлено, что при выпуклой (сферической) форме элементов (деталей) строительных машин и оборудования контактная коррозия заметно снижается за счёт естественного удаления влаги из зоны соприкосновения металлических поверхностей.

Другим рациональным методом конструирования, препятствующим контактной коррозии строительных машин и оборудования, выступает электрическое разъединение соприкасающихся металлических поверхностей. Обозначенный метод предполагает нарушение замкнутости электрической цепи разнородных металлических материалов, образующих гальваническую пару, путём изоляции их друг от друга при помощи:

а) неэлектропроводных материалов; б) изолирующих прокладок, втулок, шайб и других разъединительных деталей; в) покрытий, монтажных паст и т.п.

Ещё одним рациональным методом конструирования, исключающим или замедляющим контактную коррозию строительных машин и оборудования, исследователи называют уменьшение площади контакта металлических материалов, т.е. наибольшее сокращение площади соприкосновения друг с другом элементов (деталей) строительных машин и оборудования. Выполнение озвученной задачи также может быть реализовано за счёт придания контактирующим элементам (деталям) строительных машин и оборудования выпуклой (сферической) формы. Итоги научных наблюдений продемонстрировали, что при такой форме элементов (деталей) строительных машин и оборудования площадь их соприкосновения снижается почти в четыре раза, в результате чего скорость возникновения и протекания контактной коррозии металлов значительно уменьшается. Описанный метод экспертами рекомендуется применять в том случае, если нет возможности использовать другой способ противокоррозионной защиты.

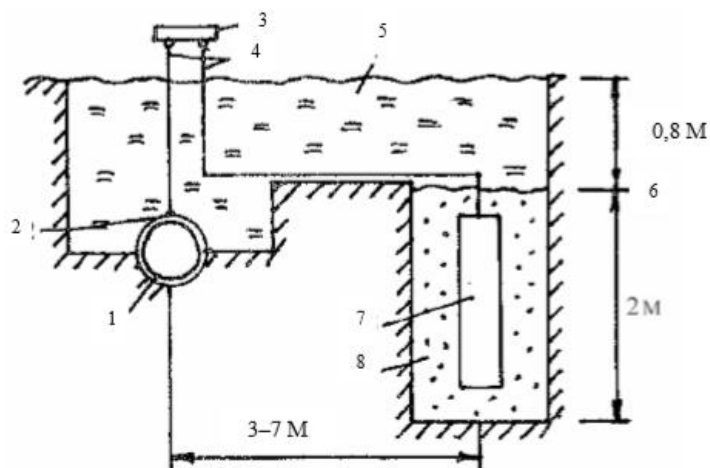
Электрохимическая защита основана на торможении анодных или катодных реакций коррозионного процесса, которая может осуществляться присоединением к защищаемой металлической поверхности другого металлического материала с более отрицательным значением электродного потенциала – протектора, а также катодной и анодной поляризацией за счёт приложенного извне тока [6], [8], [12], [13], [14], [15].

При протекторной защите к предохраняемой металлической поверхности, подвергающейся контактной коррозии, подключают протектор, изготовленный из более активного металла (рисунки 1 и 2). Например, железный элемент (деталь) строительного оборудования соприкасается с его медным элементом (деталью) в рабочей среде, содержащей окислитель. Для защиты железного элемента (детали) строительного оборудования от контактной коррозии можно установить в качестве протектора цинковую пластину, так как по отношению к железу цинк является более активным металлом. При этом, как подчёркивают специалисты, для максимально результативной защиты железного элемента (детали) строительного оборудования от контактной коррозии протектор (цинковую пластину) необходимо закрепить в непосредственной близости от зоны соприкосновения железо–медь (рисунок 3).



Рисунок 1 – Протекторная защита [12]

Производственная практика показывает, что катодная поляризация, как правило, используется для защиты от контактной коррозии подземных строительных машин и оборудования: землеройной спецтехники, бурильных установок, водооткачивающих агрегатов, трубопроводов и других технических объектов. При катодной защите защищаемая металлическая поверхность, чаще всего, подключается к отрицательному полюсу внешнего источника тока, а положительный полюс источника замыкается на землю через стальной электрод (рисунок 4). В результат чего при коррозии вспомогательный электрод (анод) растворяется, а на защищаемой металлической поверхности (катоде) выделяется водород.



1 – водопроводная труба; 2 – контакт водопроводной трубы; 3 – опознавательный знак или КИК; 4 – соединительный кабель; 5 – грунт; 6 – контур протектора; 7 – протектор; 8 – наполнитель

Рисунок 2 – Схема протекторной защиты [12]

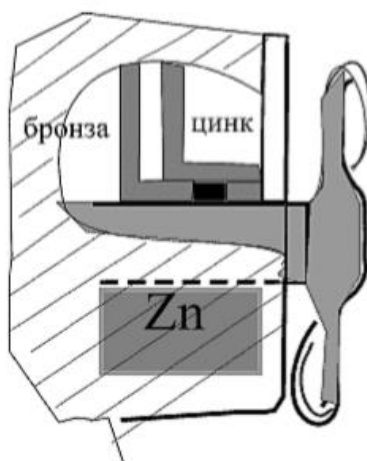


Рисунок 3 – Схема крепления протектора [12]

Не смотря на высокую противокоррозионную продуктивность данного метода, учёные обращают внимание на существование в технологии реализации катодной защиты проблемы учёта контактной разности потенциалов металлических материалов, например, при измерении стационарных (коррозионных) и поляризационных потенциалов металлов и сплавов. Исследователи подчёркивают, что реально сложившаяся практика защиты подземных строительных машин и оборудования от контактной коррозии зачастую пренебрегает учётом потенциалов металлических материалов, из которых выполнены элементы (детали) указанных технических объектов. В работах, посвящённых повышению надёжности и точности измерений как стационарных, так и поляризационных потенциалов металлов и сплавов, также зачастую игнорируется их контактная разность потенциалов. Более того, отмечают В.Г. Киселёв и С.А. Медяный, ГОСТ 9.602 – 2005 рекомендует одну и ту же методику измерения потенциалов металлических материалов вне зависимости от их вида и состава.

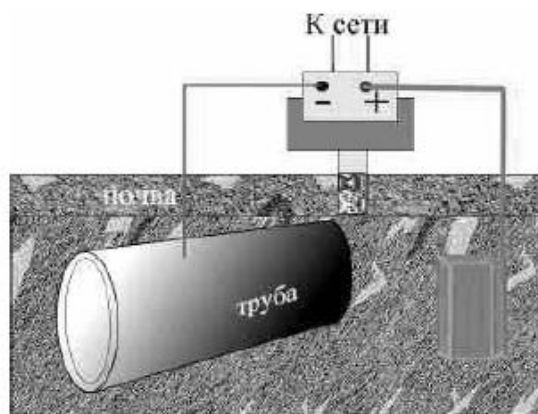


Рисунок 4 – Схема катодной защиты с применением электрического тока [12]

Вторая группа методов предотвращения и уменьшения разрушения строительных машин и оборудования от контактной коррозии металлов объединяет мероприятия, направленные на изменение свойств коррозионной (рабочей) среды. Сущность методов данной группы заключается в том, чтобы коррозионная (рабочая) среда, в которой находятся соприкасающиеся элементы (детали) строительных машин и оборудования, была менее агрессивна или становилась нейтральной [6], [7], [11], [12], [16]. Анализ научно-технической литературы позволяет утверждать, что ингибиторная защита является самым действенным методом защиты строительных машин и оборудования от контактной коррозии металлов посредством изменения свойств коррозионной (рабочей) среды.

Ингибиторная защита предполагает введение в коррозионную (рабочую) среду ингибиторов коррозии – особых веществ, присутствие которых в небольших количествах в коррозионной среде замедляет коррозию металлических материалов путём создания на их поверхности защитного барьера вследствие адсорбции данных веществ на поверхности металлических материалов [6], [12], [16]. Итоги изучения научных трудов об ингибиторной защите строительных машин и оборудования от контактной коррозии металлов, свидетельствуют о том, что не существуют универсальные ингибиторы коррозии, пригодные для защиты любых металлических материалов в различных коррозионных (рабочих) средах. Иными словами, конкретные ингибиторы коррозии можно употреблять для противокоррозионной защиты только данного металлического материала или группы сходных металлических материалов и в определённых условиях, т.е. для конкретной коррозионной (рабочей) среды. Кроме того, опытные данные доказывают, что контактная коррозия соприкасающихся элементов (деталей) строительных машин и оборудования может быть заторможена в большей или меньшей степени в зависимости от природы ингибитора и условий его применения.

Третья группа методов предотвращения и уменьшения разрушения строительных машин и оборудования от контактной коррозии металлов охватывает мероприятия, которые способствуют повышению коррозионной стойкости металлических материалов, применяемых для изготовления соприкасающихся элементов (деталей) данного вида технических объектов: пассивация металлов, легирование металлов и сплавов, использование защитных покрытий.

Пассивация металлов представляет собой процесс перехода поверхности металла в неактивное, пассивное состояние вследствие образования тонких поверхностных слоёв, препятствующих коррозии [4], [7], [12]. Практикующие специалисты, говоря о высокой эффективности данного метода для повышения коррозионной стойкости металлов, отмечают его значительную стоимость. Легирование металлов и сплавов предполагает введение в их состав специальных добавок (легирующих компонентов) с целью получения материалов с более совершенным защитным слоем продуктов коррозии или с пониженной

анодной активностью [4], [7], [12]. Другими словами, при легировании в состав металлических материалов входят химические элементы, вызывающие их пассивирование. Чаще всего, в качестве таких легирующих компонентов применяют хром, никель, кремний, вольфрам и другие. Например, легирование стали легко пассивирующимися металлами (хром, никель, алюминий, титан) или катодными добавками (медь) облегчает пассивирование стали, в результате чего происходит снижение контактной коррозии.

Использование защитных (противокоррозионных, антикоррозионных) покрытий заключается в нанесении на поверхность соприкасающихся элементов (деталей) строительных машин и оборудования специальных веществ, препятствующих процессу их коррозии путём изоляции от коррозионной среды и контактов электрохимически разнородных металлических материалов [3], [12], [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23]. Для защиты соприкасающихся элементов (деталей) строительных машин и оборудования от контактной коррозии металлов в зависимости от условий эксплуатации применяют металлические и неметаллические защитные покрытия.

В научно-технической литературе описываются следующие неметаллические покрытия, показавшие наибольшую надёжность при защите строительных машин и оборудования от контактной коррозии металлов: а) защитные плёнки, получаемые путём химического превращения поверхностного слоя металлических материалов; б) неорганические эмалевые покрытия; в) лакокрасочные покрытия.

Создание защитных плёнок на поверхностях соприкасающихся элементов (деталей) строительных машин и оборудования, чаще всего, осуществляется оксидированием, фосфатированием и анодированием. Оксидирование представляет собой способ получения на металлических поверхностях оксидных плёнок, исключающих или уменьшающих контактную коррозию металлов. Фосфатирование заключается в получении на металлических поверхностях фосфатных плёнок, исключающих или уменьшающих контактную коррозию металлов, посредством погружения металлоизделий в растворы фосфорной кислоты и её кислых солей при температуре (96 ... 98) °С. Анодированием получают, как правило, на алюминиевых поверхностях оксидные плёнки, исключающих или уменьшающих контактную коррозию. Общеизвестно, что в обычных условиях на поверхности алюминия присутствует тонкая оксидная плёнка, которая не может защитить его от коррозии. Однако, под воздействием окружающей среды алюминий покрывается слоем продуктов коррозии. Замечено, что процесс искусственного образования оксидных плёнок повышает эффективность защиты алюминиевых элементов (деталей) строительных машин и оборудования от контактной коррозии.

Переходя к характеристике неорганических эмалевых покрытий, необходимо подчеркнуть, что неорганические эмали по своему составу являются силикатами, т.е. соединениями кремния. К основным недостаткам таких покрытий эксперты относят хрупкость и растрескивание при тепловых и механических ударах. В этой связи для защиты строительных машин и оборудования от контактной коррозии металлов наиболее широкое применение получили лакокрасочные покрытия. Основным компонентом лакокрасочного материала, представляющего собой многокомпонентную систему, является плёнкообразующее вещество, которое после нанесения на поверхность соприкасающихся элементов (деталей) строительных машин и оборудования способно в результате химических или физических превращений образовывать прочное лакокрасочное покрытие и обуславливать его адгезию к подложке. В качестве таких веществ, как правило, используют синтетические или природные олигомеры или высокомолекулярные соединения. При этом, ряд экспертов обращает внимание на то, что для обеспечения высокопродуктивной защиты строительных машин и оборудования от контактной коррозии металлов лакокрасочное покрытие должно быть: сплошным, газо- и водонепроницаемым, химически стойким, эластичным, обладать высоким сцеплением с защищаемыми металлами, обладать механической прочностью и твёрдостью. В процессе лабораторных исследований доказано, что коррозия под лакокрасочными покрытиями,

электрохимическая по своей природе, зависит от природы и концентрации электролитов и паров кислот в воздухе, поэтому к ней применимы все основные законы электрохимического разрушения металлов.

Проведённый научный анализ позволяет утверждать, что металлические покрытия занимают особое положение среди средств защиты строительных машин и оборудования от контактной коррозии металлов, так как их действие имеет двойственный характер, которое не отличается от действия любого механического защитного слоя (окраска, оксидная плёнка и т.д.). Защита от контактной коррозии металлическими покрытиями заключается в нанесении на поверхности соприкасающихся элементов (деталей) строительных машин и оборудования слоя более активного металла. Большинство исследователей отмечают, что металлические покрытия должны быть непроницаемы для коррозионных агентов, так как защитное действие данного покрытия сводится к изоляции защищаемой металлической поверхности. Однако, М. Кубалла и Й. Кранц считают, что защитная функция металлических покрытий сохраняет свое действие и в том случае, если защитный слой имеет повреждения или трещины. Все металлические покрытия в зависимости от значения их потенциала по отношению к потенциалу защищаемого металлического материала в конкретной коррозионной (рабочей) среде можно подразделить на катодные и анодные (рисунок 5).

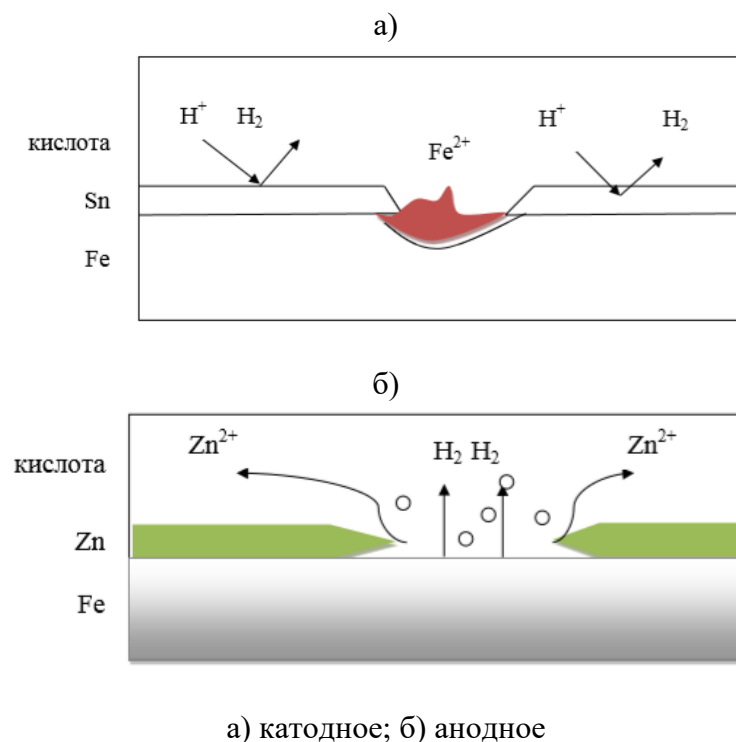


Рисунок 5 – Виды металлических защитных (антикоррозионных) покрытий [12]

К катодным металлическим покрытиям учёные относят покрытия, потенциалы которых в данной среде имеют более положительное значение, чем потенциал защищаемого металлического материала. Например, в качестве катодных покрытий на стальных элементах (деталях) строительных машин и оборудования можно применять медь, никель и другие. Однако, по мнению некоторых экспертов, наибольшую технологичность в этом случае имеет покрытие железа с оловом. При этом, было замечено, что такие катодные покрытия могут защищать стальные элементы (детали) строительных машин и оборудования от контактной коррозии металлов только при

отсутствии пор и повреждений этих покрытий, поскольку при наличии влаги в местах повреждения данных покрытий происходит электрохимическая коррозия железа.

Анодные покрытия имеют более отрицательный потенциал, чем потенциал защищаемого металлического материала. Примером таких покрытий являются цинковые покрытия на поверхностях железных элементов (деталей) строительных машин и оборудования. Тем не менее, практикующие специалисты замечают, что в случае нарушения целостности цинкового покрытия на поверхности железных элементов (деталей) строительных машин и оборудования анодом выступает цинк, а катодом – железная поверхность. В результате чего, на поверхности железных элементов (деталей) строительных машин и оборудования будет наблюдаться либо восстановление ионов водорода (водородная деполяризация), либо восстановление кислорода (кислородная деполяризация).

В научных трудах утверждается, что одним из чрезвычайно действенных методов защиты алюминиевых элементов (деталей) строительных машин и оборудования от контактной коррозии является нанесение на их поверхности металлических покрытий гальванически совместимых с алюминием. Согласно точки зрения ряда исследователей, наиболее подходящими для защиты алюминиевых элементов (деталей) строительных машин и оборудования от контактной коррозии являются покрытия из кадмия и цинка, которые во многих условиях имеют близкие с алюминием электродные потенциалы. Однако, производственная практика показала, что гальванические методы осаждения таких покрытий представляют серьезную экологическую опасность, особенно в случае кадмия. В этой связи учёные говорят о целесообразности применения вместо гальванических методов осаждения вакуумных методов формирования металлических покрытий, одним из достоинств которых является возможность нанесения на поверхностях алюминиевых элементов (деталей) строительных машин и оборудования таких металлов, которые гальванически осадить невозможно или затруднено.

Для защиты от контактной коррозии элементы (детали) строительных машин и оборудования, изготовленные из сплавов на основе железа, предлагается покрывать алюминием, цинком, кадмием, хромом, оловом или никелем. Результаты промышленных испытаний доказали, что оцинкованные элементы (детали) строительных машин и оборудования, произведённые из сплавов на основе железа, лучше защищены от контактной коррозии, чем не оцинкованные, поскольку при соприкосновении с коррозионной (рабочей) средой железо получает защиту от более активного цинка, который при этом переходит в раствор. Высокопродуктивным методом получения металлических покрытий из хрома, олова или никеля на элементах (деталях) строительных машин и оборудования, выполненных из сплавов на основе железа, учёные называют плакирование, заключающееся в покрытии защищаемых металлических поверхностей слоем другого металла или композитным составом под воздействием давления и высоких температур за счёт диффузии и склеивания поверхностей [7], [11], [12], [21]. Техничко-технологическая практика свидетельствует о методах гальванического и вакуумного осаждения алюминиевых, цинковых и кадмиевых покрытий на элементах (деталях) строительных машин и оборудования, сделанных из сплавов на основе железа. Экспериментальные данные по получению на стальных поверхностях перечисленных покрытий ионно-лучевым ассистированным методом в сравнении с гальваническим методом осаждения этих покрытий констатируют, что [23]:

–наибольшие значения плотности тока контактной коррозии (примерно $2 \cdot 10^{-2}$ мА/см²) достигаются 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^{-4} мА/см²) получаются в парах алюминия и его сплава Д16 с Al покрытиями на сталях, сформированными вакуумным ионно-лучевым ассистированным осаждением;

– 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;

– 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 $6 \cdot 10^{-3} \sim \text{мА/см}^2$) примерно в три раза меньше скорости саморастворения цинка ($2 \cdot 10^{-2} \text{ мА/см}^2$) в 3%-м растворе NaCl.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод о том, что: во-первых, основное преимущество ионно-лучевого ассилируемого метода получения металлических покрытий на стальных поверхностях заключается в возможности беспрепятственного осаждения алюминия на эти поверхности; во-вторых, полученное алюминиевое покрытие на стальных поверхностях будет обладать отличной гальванической совместимостью с элементами (деталью) строительных машин и оборудования, выполненными из алюминия и его сплавов; в-третьих, гальваническое осаждение алюминия на стальные поверхности осуществить крайне сложно, тогда, как вакуумное осаждение алюминия на эти поверхности ничем не отличается от осаждения других металлов.

Подводя итоги нашего исследования, считаем обязательным акцентировать внимание на том, что выбор метода защиты или комплекса защитных мер от контактной коррозии металлов, всегда необходимо производить в зависимости от технических требований к строительным машинам и оборудованию, условий и сроков их эксплуатации, а также с учётом экономической целесообразности.

Список литературы:

1. Степанов К.И. Контактная и щелевая коррозия конструкционных материалов в условиях работы высокотемпературного генератора абсорбционных бромистолитиевых холодильных машин / К.И. Степанов, О.В. Волкова // Холодильная наука и кондиционирование. – СПб., 2013. – № 1. – С.9–14.
2. Сорокин А.И. Исследование процесса разрушения алюминиевого сплава от контактной коррозии в высокоскоростном потоке морской воды / А.И. Сорокин // Вісник СевНТУ : зб. наук. пр. Вип. 132/2012. Серія: Механіка, енергетика, екологія. – Севастополь, 2012. – С.135–141.
3. Jinming X. The corrosion properties of Al/Al₂O₃ multilayered coatings on CK45 steel deposited by IBAD / X. Jinming, Z. Weijiang, G.K. Wolf // Surface and Coatings Technology. – 2004. – Vol. 187. – P.194–198.
4. Chao L.-C. Effect of surface morphology of metallic zinc films deposited by ion beam sputter deposition on the formation of ZnO nanowires / L.-C. Chao, C.-F. Lin, C.-C. Liao // Vacuum. – 2011. – Vol. 86. – P.295–298.
5. Артемьев Г.А. Контактная коррозия металлов: теория вопроса / Г.А. Артемьев, С.В. Гиннэ // Научные исследования XXI века: теория и практика (SCIENTIFIC RESEARCH OF THE XXI CENTURY: THEORY AND PRACTICE) : Материалы Международной научно-практической конференции, 16 июня 2020 года (г. Прага, Чехия). – Прага : Vydavatel «Osvícení», Нефтекамск : Научно-издательский центр «Мир науки», 2020. – С.20 – 26.
6. Малахов А.И. Коррозия и основы гальваностегии : Учебник для техникумов. – 2-е изд., перераб. и доп. / А.И. Малахов, К.М. Тютина, Т.Е. Цупак. – М. : Химия, 1987. – 208 с.

7. Хохлачёва Н.М. Коррозия металлов и средства защиты от коррозии : учебное пособие / Н.М. Хохлачёва, Е.В. Ряховская, Т.Г. Романова. – М. : ИНФРА-М, 2016. – 118 с.
8. Киселёв В.Г. Основные закономерности влияния скачка потенциала между двумя металлами на их контактную коррозию / В.Г. Киселёв, С.А. Медяный // Проблемы энергетики. – С-Пб., 2013. – № 9-10. – С.89-96.
9. Стогний Г.В. Перспективы исследования контактной коррозии металлов в современном корабле- и судостроении / Г.В. Стогний // Водный транспорт. – Киев, 2013. – № 2. – С.43-51.
10. ГОСТ 9.005-72. Допустимые и недопустимые контакты металлов. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 22 с.
11. Стариков А.Н. Способ снижения контактной коррозии. / А.Н. Стариков, Е.В. Карцева, И.Б. Брыль // Технические науки. – Чебоксары, 2015. – № 4. – С.219-221.
12. Лазуткина, О.Р. Химическое сопротивление и защита от коррозии : учебное пособие / О.Р. Лазуткина. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 140 с.
13. Фрейман Л.И. Об ускоренных испытаниях и совершенствовании медно-сульфатных электродов длительного действия для систем катодной защиты / Л.И. Фрейман, Е.Г. Кузнецова, М.А.Сурис, В.М.Левин // Монтажные и специальные работы в строительстве. – М., 1999. – № 7. –С.17–19.
14. Киселёв В.Г. Экспресс-прогноз долговечности электродов сравнения для установок электрохимической защиты / В.Г. Киселёв, В.Г. Волокитин, С.В. Дончевский, Г.И. Сигаев // Монтажные и специальные работы в строительстве. – М., 1997. – № 9. – С.25–28.
15. ГОСТ 9.602 – 2005. Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии. – М. : «Стандартинформ», 2006. – 25 с.
16. Navinsek B. PVD coatings as an environmentally clean alternative to electroplating and electroless process / B. Navinsek, P. Panjan, I. Milosev // Surface and Coatings Technology. – 1999. – Vol. 116-119. – P.476-487.
17. Зиневич А.М. Антикоррозионные покрытия / А.М. Зиневич, А.А. Козловская. – М.: Стройиздат, 1989 г. – 109 с.
18. Розенфельд И.Л. Защита металлов от коррозии лакокрасочными покрытиями / И.Л. Розенфельд, Ф.И. Рубинштейн, К.А. Жигалова. – М. : Химия, 1987 г, – 224 с.
19. Лебедев В.П. Справочник по противокоррозионным лакокрасочным покрытиям / В.П. Лебедев, Р.Э. Калдма, В.Л. Авраменко – Х. : Прапор, 1988 г. – 229 с.
20. Медведев М.С. Современные способы нанесения лакокрасочного покрытия / М.С. Медведев // ЭПИ Международный научно-практический журнал «Эпоха науки» : научный журнал / Краснояр. гос. аграр. ун-т. Ачинский ф-л. – Ачинск, 2020. – № 24. – С.100 – 103.
21. Кубалла М. Химия. Карманный репетитор / М. Кубалла,, Й. Кранц, – Минск, Вассамедиа, 2007. – 240 с.
22. Enders B., KnauB 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.
23. Матыс В.Г. Устойчивость алюминия и его сплава к контактной коррозии в гальванопарах со сталями с металлическими покрытиями. / В.Г. Матыс, В.В. Поплавский // Химия и технология неорганических материалов и веществ. – Минск, 2015. – № 3. – С.85–92.

