

АСТРАХАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



Кафедра "Общая, неорганическая и
аналитическая химия"

ЭЛЕКТРОХИМИЯ

Часть II. Коррозия и защита металлов

Учебное пособие по общей химии

Астрахань
2006

Электрохимия. Ч. II. Коррозия и защита металлов: Учеб. пособие по общей химии / Н.Н. Старкова, Ю.И. Рябухин / Астрахан. гос. техн. ун-т. – Астрахань, 2006. – 33 с.

Пособие содержит теоретический материал в объёме, соответствующем Государственному Образовательному Стандарту Высшего Профессионального Образования дисциплины "Химия", а также примеры решения задач и варианты заданий для самостоятельной работы, направляющих студентов на осознанную проработку основ раздела электрохимии "Коррозия металлов".

Предназначено для студентов, изучающих дисциплину "Химия", рекомендовано студентам химико–технологического профиля, изучающих дисциплину "Общая и неорганическая химия".

Рис.4, табл. 1, библиогр. 12 назв.

Печатается по решению кафедры "Общая, неорганическая и аналитическая химия". Протокол № ... от 2006г.

Рецензент: Почётный профессор АГТУ Е.Е. Кравцов

ВВЕДЕНИЕ

Коррозией называется явление и процесс самопроизвольного разрушения изделий из металлов* под воздействием окружающей среды.

Термин “коррозия” произошёл от латинского словообразования *corrodo* [*cum* + *rodo*] (обгрызать, изгрызать), где корень *rodo* – разъедать. Понятие о коррозии металлов (ржавлении железа) известно с древнейших времен, однако в современном понимании этот термин появился в 1667 году в английском журнале “Philosophical Transactions”. В России явление коррозии металлов впервые исследовал М.В.Ломоносов.

Коррозия металлов – процесс самопроизвольный, который протекает непрерывно и приносит огромные убытки.

В Международном стандарте ИСО 8044-1986 под термином *коррозия* подразумевают *физико-химическое взаимодействие между металлом и средой, в результате которого изменяются свойства металла и часто происходит ухудшение функциональных характеристик металла, среды или включающей их технической системы.*

Среда, вызывающая коррозию, называется *коррозионной* или *агрессивной*.

Способность металлов противостоять коррозионному воздействию внешней среды *называют коррозионной стойкостью.*

Защита металлов от коррозии является одной из важнейших проблем, поскольку потери от коррозии, например в промышленности и на транспорте, сравнимы с затратами на развитие крупнейших отраслей экономики.

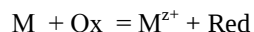
*Металлы (от греч. *metallon* – первоначально шахта, копи), вещества, обладающие в обычных условиях характерными, металлическими свойствами – высокими электро- и теплопроводностью, блеском, пластичностью. Важнейший признак металлов – отрицательный температурный коэффициент электрической проводимости, то есть понижение электрической проводимости с ростом температуры. К металлам относят как собственно металлы (простые вещества), так и их сплавы, металлические соединения, в том числе интерметаллиды.

Металлы (эдесь и далее) – конструкционные материалы на основе металлов и их сплавов друг с другом и неметаллами.

Прямые потери от коррозии включают стоимость капитального и текущего ремонта машин, оборудования и коммуникаций, преждевременно выходящих из строя из-за коррозии, а также дополнительные эксплуатационные расходы на защиту от коррозии. Прямые потери металлов от коррозии в результате разрушения, например, трубопроводов, химического оборудования, деталей машин, цистерн, составляют около 10 % их ежегодной выплавки. В результате коррозии металлические изделия утрачивают свои технические и эксплуатационные свойства.

К косвенным потерям относят экономический ущерб, возникающий из-за аварийных ситуаций, простоя оборудования, снижения качества продукции по причине коррозии. К косвенным затратам относятся утечка нефти, газов и других продуктов из прокорродировавшего трубопровода, загрязнение окружающей среды и, как следствие, вредное влияние на здоровье человека и животных. Косвенные затраты могут превышать прямые затраты в несколько раз, особенно в химической и нефтехимической отраслях промышленности, в производстве цветных металлов.

Основная причина коррозии металлов и сплавов заключается в их термодинамической неустойчивости. Процесс окисления многих металлов, происходящий под воздействием какого-либо окислителя в атмосферных условиях является термодинамически разрешённым, то есть изменение энергии Гиббса реакции



(M – металл, M^{z+} – его окисленная форма, ион;
Ox – окислитель, Red –его восстановленная форма)

с участием большинства металлов оказывается меньше нуля ($\Delta G < 0$).

Коррозионному разрушению практически не подвергаются металлы, встречающиеся в природе в самородном виде: Au, Ag, Pt, Hg и некоторые другие.

СКОРОСТЬ КОРРОЗИИ

Общепринятыми являются три показателя скорости коррозии: весовой показатель, глубинный показатель и электрохимическая единица.

Весовой показатель соответствует массе металла, "растворившегося" с единицы его поверхности за единицу времени [г/м²·час] или [мг/дм² · сутки].

Глубинный показатель характеризует проникновение коррозионного разрушения, то есть определяет, на какую глубину прокорродировал металл за единицу времени [мм / год].

Электрохимическая единица — коррозионный ток (I) или плотность тока ($i = I/S$, где S — площадь поверхности), представляющая собой суммарную силу (плотность) тока всех коррозионных пар, функционирующих на поверхности металла.

Коррозионные процессы протекают на поверхности металла при взаимодействии его с газом или жидкостью. Такой механизм называют гетерогенным и его можно представить в виде следующих этапов:

- транспортировки реагентов к границе раздела фаз;
- химического взаимодействия;
- отвода продуктов из реакционной зоны.

Любой из этих этапов может состоять из элементарных стадий, протекающих:

- последовательно друг за другом $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D$,
- параллельно
$$\begin{array}{l} \quad \quad \quad | \rightarrow B \\ A \longrightarrow | \rightarrow C \\ \quad \quad \quad | \rightarrow D, \end{array}$$
- сопряжённо.
$$\begin{array}{l} \quad \quad \quad | \rightarrow C \\ A \rightarrow B \longrightarrow | \\ \quad \quad \quad | \rightarrow D. \end{array}$$

Скорость коррозии определяется скоростью процессов самой медленной из последовательно протекающих стадий, либо скоростью самой быстрой из параллельных стадий. Определение лимитирующей стадии процесса – ключевой вопрос кинетики коррозионных процессов. Зная лимитирующую стадию и её механизм, можно воздействовать на него и тем самым тормозить коррозионное разрушение.

ХИМИЧЕСКАЯ КОРРОЗИЯ

По механизму протекания процесса различают два основных типа коррозии: химическую и электрохимическую.

Химической коррозией называют разрушение металлов в результате их окисления в окружающей среде без возникновения электрического тока. Такая коррозия характерна для сред, не являющихся электролитами, когда происходит непосредственное взаимодействие металлов с окислителями окружающей среды. Химическую коррозию подразделяют на **газовую коррозию** - разрушение металла под действием агрессивных газов (кислород, хлор, оксиды серы, углерода, азота) и коррозию в жидкостях – **неэлектролитах** - агрессивных жидких средах (смазочные масла, нефть и нефтепродукты).

Газовая коррозия – наиболее распространённый вид химической коррозии. Это процесс разрушения металлов и сплавов в результате химического взаимодействия с газами при высоких температурах, когда невозможна конденсация влаги на поверхности металла. Газовая коррозия наблюдается при работе металлических конструкций, контактных и других аппаратов, арматуры обжиговых и нагревательных печей, деталей двигателей внутреннего сгорания, при термической обработке, горячей прокатке, ковке.

Типичный случай газовой коррозии – взаимодействие металлов с кислородом.

Образование на поверхности металла оксидной плёнки, которая может защищать металл от дальнейшего окисления, является следствием:

- адсорбции молекул кислорода поверхностью металла, соприкасающейся с атмосферой;
- химического взаимодействия металла и газа.

В результате этого формируется сначала мономолекулярный, а затем полимолекулярный слой оксида. В дальнейшем атомы кислорода диффундируют через образовавшийся слой оксида, одновременно с этим в противоположном направлении диффундируют ионы металла. Реагируя с кислородом, ионы металла образуют оксид, что приводит к образованию новых слоев плёнки, то есть к её утолщению. По мере утолщения оксидная плёнка за счёт ослабления процесса диффузии тормозит развитие коррозионного процесса, однако, лишь в том случае, если она проявляет выраженные защитные свойства.

Чтобы оксидная плёнка эффективно защищала поверхность металла, она должна удовлетворять следующим требованиям:

- быть сплошной и беспористой;
- иметь хорошее сцепление с металлом (адгезию*);

- иметь коэффициент термического расширения, по величине, близкий к таковому для металла;
- быть химически инертной по отношению к данной агрессивной среде;
- обладать твёрдостью и износостойкостью.

*Адгезия – сцепление приведённых в контакт разнородных конденсированных фаз, обусловленное межмолекулярными взаимодействиями или химической связью.

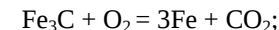
Если образовавшаяся оксидная плёнка пористая, рыхлая и имеет плохую адгезию к металлу, то даже при условии её инертности к окружающей агрессивной среде она не будет проявлять защитных свойств.

Основным требованием к формирующейся оксидной плёнке является условие её сплошности, которое определяется соотношением между объёмами окисляемого металла (V_M) и образующегося оксида ($V_{окс}$) и формулируется так: молярный атомный объём** металла должен быть меньше молекулярного объёма оксидной плёнки. В этом случае можно ожидать образования сплошных плёнок.

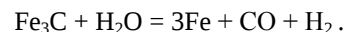
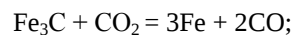
Важным условием формирования защитных оксидных плёнок является ориентационное соответствие образующейся плёнки металлу. Сущность такого соответствия сводится к требованию максимального сходства кристаллических решёток металла и его оксида, тогда наблюдаемые защитные свойства оксидных плёнок лучше.

Подобные закономерности могут быть применимы и к плёнкам других типов, формирующихся на поверхности металла из продуктов коррозии.

Газовая коррозия железа. При нагревании выше 600 °С на железе, чугунах и углеродистых сталях образуется слой – окалина, имеющая сложную неоднородную кристаллическую структуру. Толщина слоя различных оксидов железа зависит от температуры, времени коррозии и состава газовой среды. Наиболее близкий по структуре к железу слой оксида FeO обладает лучшими защитными свойствами. Слои оксидов железа Fe₂O₃, Fe₃O₄ имеют поры и трещины и легко отслаиваются. В стали наряду с окислением железа происходит и его восстановление за счёт взаимодействия карбида с кислородом воздуха, оксидом углерода (IV) и парами воды:

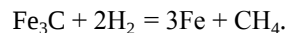


**Молярный атомный объём есть отношение молярной массы простого вещества к плотности, экстраполированной на температуру 0 К: $V_M = M/\rho$ [см³/моль].



В результате этих процессов поверхностные слои чугуна и стали обедняются углеродом, а это приводит к изменению их структуры и ухудшению механических и антикоррозионных свойств.

Чугун и сталь обезуглероживаются и в среде водорода в соответствии с уравнением реакции:

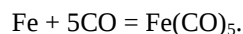


Этот тип газовой коррозии, называемый *водородной*, наблюдается при взаимодействии водорода с железоуглеродистыми сплавами при высоких температурах и давлениях. Например в колоннах синтеза аммиака, где процесс ведут при 450—550 °С и давлении 25–100 МПа (2,5–10 бар*).

* 1 бар соответствует одной технической атмосфере, что равно 10^5 Па (Н/м^2) или 750 мм рт. ст.

Карбонильная коррозия – процесс разрушения металлов при взаимодействии с оксидом углерода (II), который при высоких давлениях и температурах (например, в процессах получения синтетических спиртов: метилового, бутилового и др.) может образовывать с металлами легко возгоняющиеся карбонилы $\text{M}(\text{CO})_n$.

В случае железа реакция идёт с образованием пентакарбонила:



Коррозии под *действием хлороводорода* и, особенно, *хлора* подвержены почти все металлы. Реакция образования хлоридов металлов



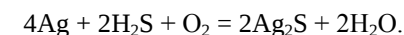
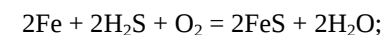
весьма экзотермична, и если скорость отвода теплоты ниже скорости реакции, то металлы могут сгорать в атмосфере хлора. Поэтому этот тип газовой коррозии принципиально отличается от других.

Коррозия металлов в жидкостях – **неэлектролитах** – это коррозия в жидких неэлектропроводных средах, к которым относятся жидкости органического происхождения, например, спирты, бензол, хлороформ,

тетрахлорид углерода, нефть, бензин и керосин, а также ряд жидкостей неорганического происхождения, например расплавленная сера, бром.

Органические жидкости, нефть и жидкие нефтепродукты практически не реагируют с металлами, но в присутствии даже незначительного количества примесей процессы резко интенсифицируются. Примесями–ускорителями коррозионных процессов являются содержащиеся в нефти сероводород, меркаптаны, а также элементарная сера. Меркаптаны (тиоспирты R—SH) вызывают коррозию меди, никеля, свинца, олова, серебра и других металлов с образованием меркаптидов типа R—SM или (R—S)₂M.

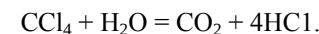
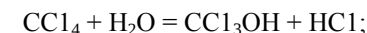
Сероводород, содержащийся в нефти, взаимодействует с железом, свинцом, медью, серебром с образованием сульфидов:



Присутствие воды усиливает коррозионную активность сырой нефти, содержащей меркаптаны и сероводород. Бензин прямой перегонки при отсутствии воды практически не оказывает коррозионного воздействия на сплавы чёрных* металлов. Крекинг–бензины при взаимодействии с металлами (Fe, Cu, Mg, Pb, Zn) осмоляются, кислотность среды возрастает, что и способствует коррозии.

* Чёрные металлы – общее название железа и его сплавов (сталей, чугунов, ферросплавов). Сталями называют сплавы, в которых содержание углерода не превышает 2 %, а чугунами – сплавы, в которых углерода больше – от 2 до 6,5 %. Как правило, в состав и чугунов, и сталей входит до 15–20 различных химических элементов.

Повышение температуры окружающей среды, наличие растворённого кислорода приводит к усилению процесса коррозии. Присутствие в жидкостях–неэлектролитах влаги вызывает интенсивное протекание процесса коррозии по электрохимическому механизму. Например, при наличии в тетрахлориде углерода следов воды скорость коррозии стали резко возрастает, что связано с образованием агрессивных продуктов в результате гидролиза, протекающего по уравнениям:



Алюминий разрушают даже безводные хлорсодержащие органические растворители.

Сера в расплавленном состоянии реагирует практически со всеми металлами, заметно разрушая олово, свинец, медь, меньше – углеродистые стали и титан и незначительно – алюминий.

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ КОРРОЗИЯ

Электрохимической коррозией называют коррозию, при которой происходит разрушение металла в результате возникновения гальванической пары и появления внутри системы электрического тока.

Такая коррозия возникает при контакте металла с раствором электролита.

Поверхность любого металла гетерогенна (неоднородна) и состоит из множества короткозамкнутых микрогальванических элементов. При контакте с раствором электролита микрокоррозионные системы элементов начинают функционировать, что приводит к разрушению (коррозии) металла.

Причины, создающие гетерогенность в системе металл – электролит различны. Среди них можно выделить три основные:

- неоднородность металлической фазы;
- неоднородность жидкой фазы;
- неоднородность наложения внешних условий.

Неоднородность металлической фазы вызвана наличием электропроводящих включений (примесей или компонентов сплава), наличием поверхностных дефектов, анизотропностью* металлического кристалла, неоднородностью защитных оксидных плёнок на поверхности металла.

*Анизотропия – зависимость некоторых макроскопических свойств кристаллов от направления.

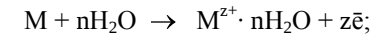
Неоднородность жидкой фазы (электролита) связана с различной концентрацией ионов данного металла на отдельных участках поверхности раздела фаз, различной концентрацией растворённого в электролите кислорода, различием в кислотности среды (рН) отдельных зон объёма электролита.

Неоднородность наложения физических условий вызывается неравномерностью температуры отдельных участков поверхности металла при контакте с электролитом либо неравномерным наложением внешнего электрического поля.

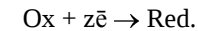
Механизм электрохимического разрушения металлов как гипотеза работы микрогальванических элементов предложен в XIX в. швейцар-

ским химиком Де ля Ривом. При инициировании и развитии электрохимической коррозии одновременно протекают два электродных процесса:

- анодный – переход ионов металла в раствор с оставлением соответствующего числа электронов на поверхности металла:



- катодный – ассимиляция (усвоение) избыточных электронов ионами, атомами или молекулами электролита (деполяризаторами*), которые при этом восстанавливаются:



*Деполяризатор – агент, вызывающий электродную деполяризацию – снижение или устранение поляризации электродов при работе химических источников тока (гальванических элементов).

Анодный и катодный процессы протекают сопряжённо и замедление одного из них тормозит другой. Из приведённых схем реакций видно, что разрушение металла (коррозия) происходит на аноде.

Принципиальная схема электрохимического механизма коррозии металла приведена на рис. 1.

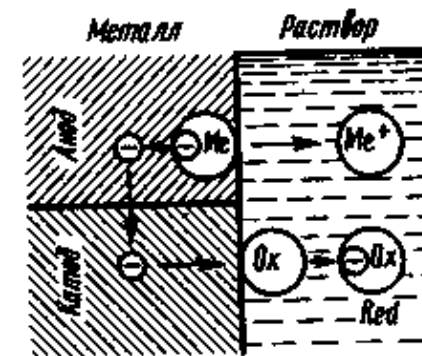


Рис. 1. Схема электрохимической коррозии.

Анодный и катодный процессы классифицируют как первичные процессы коррозии, а их продукты – первичными продуктами коррозии.

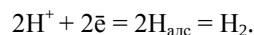
При электрохимической коррозии возможно протекание и вторичных процессов: взаимодействие первичных продуктов коррозии друг с

другом и компонентами раствора с образованием вторичных продуктов коррозии. Наибольшее значение при этом имеет образование плёнок трудно растворимых соединений (например, гидроксидов, фосфатов), которые затрудняют доступ компонентов электролита к поверхности металла и тем самым противодействуют процессу электрохимической коррозии.

Приблизённо судить о термодинамической нестабильности металлов в растворах электролитов, то есть о возможности электрохимической коррозии металлов можно по стандартным электродным потенциалам (см. Приложение).

В зависимости от характера процесса, протекающего на катоде, различают несколько типов электрохимической коррозии.

Один из них – **коррозия с водородной деполяризацией**, когда сопряжённым растворению металла процессом является восстановление ионов водорода:



Такой коррозионный процесс возможен в любых средах (нейтральных, щелочных, кислых). Однако обычно он происходит при транспортировке и хранении кислот, кислотном травлении проката и кислотной очистке металлических поверхностей.

Термодинамическая вероятность коррозии с водородной деполяризацией определяется условием:

потенциал окисления металла (E_M) должен быть отрицательнее потенциала реакции восстановления катионов водорода (E_{H^+}), то есть

$$E_M < E_{\text{H}^+}.$$

Равновесный потенциал выделения водорода зависит от активности (концентрации) ионов водорода в растворе и согласно уравнению Нернста при стандартных условиях определяется равенством (см. Электрохимия. Ч.I.[...])

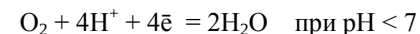
$$E_{\text{H}^+} = -0,059 \text{ рН}.$$

Следовательно, неравенство

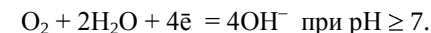
$$E_M < -0,059 \text{ рН}$$

является условием термодинамической вероятности процесса коррозии металла с водородной деполяризацией.

Коррозия большинства металлов и сплавов протекает в условиях восстановления молекулярного кислорода – **коррозия металлов с кислородной деполяризацией**



или



Термодинамическая вероятность процесса коррозии с кислородной деполяризацией определяется неравенством

$$E_{\text{M}} < E, \text{O}_2$$

или

$$E_{\text{M}} < 1,23 - 0,059 \text{ pH}$$

(1,23 – стандартный электродный потенциал кислорода).

С кислородной деполяризацией протекают атмосферная коррозия, коррозия в морской и пресной воде, в растворах солей, в аэрированных растворах органических кислот, подземная коррозия и др.

Кроме рассмотренных типов катодных процессов возможны процессы электрохимической коррозии с восстановлением других окислителей.

НЕКОТОРЫЕ ВИДЫ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ КОРРОЗИИ

Атмосферная коррозия, – электрохимическая коррозия, протекающая под воздействием атмосферных факторов (коррозия во влажном воздухе). Пары воды и растворённые в ней газы (кислород и газы, образующие с водой кислоты: диоксид углерода, оксиды серы и азота) конденсируются на поверхности металла, образуя тонкий слой электролита, в результате резко увеличивается скорость передачи электронов от металла к окислителю.

Почвенная коррозия – электрохимическая коррозия в почвах и грунтах. Она приводит к разрушению подземных сооружений в результате соприкосновения металла с влагой грунта, содержащей растворённый кислород. Скорость коррозии при этом зависит как от состава грунтовых вод, так и от структуры и минералогического состава грунта.

Электрохимическая *коррозия при неравномерной аэрации* наблюдается, когда доступ растворённого кислорода к различным участкам металлического изделия или конструкции неодинаков. При этом те участки металла, доступ кислорода к которым минимален, корродируют зна-

чительно сильнее. Это обусловлено тем, что на участках, где доступ кислорода больше, вследствие восстановления кислорода происходит подщелачивание и металлы пассивируются.

Контактная коррозия или *гальванокоррозия*, – это местная электрохимическая коррозия, вызываемая наличием контакта изделий из разнородных металлов в растворе электролита. Такая коррозия возникает в сплавах или при непосредственном контакте двух металлов. Механизм такой коррозии соответствует механизму действия гальванических элементов. Участки металла с меньшим электродным потенциалом являются анодными, а с большим – катодными. На анодных участках происходит окисление металла, освобождающиеся электроны переходят на катодный участок, где восстанавливают окислители. Возникновение микрогальванических пар в большинстве случаев объясняется структурной неоднородностью сплавов. Так, в углеродистых сталях роль катодных участков выполняет карбид железа, а роль анодных участков – остальная поверхность стали.

Электрическая коррозия, или *электрокоррозия*, – это особая разновидность электрохимической коррозии, возникающей при воздействии на изделие, находящееся в грунте, потенциала от плохо заземлённого электрооборудования или под действием блуждающих электрических токов. Постоянные токи, протекающие по рельсам трамваев, метро, электрифицированных железных дорог, при нарушении контакта стремятся обойти сопротивление, и часть электрического тока уходит в землю. Такие токи называют блуждающими. Если на их пути встречаются металлические сооружения (электрокабели, трубопроводы и т.д.) токи проходят по ним и возвращаются к источнику. Те участки металлического подземного сооружения, из которого постоянный ток выходит в землю, являются анодными и подвергаются коррозии. Участки подземного металлического сооружения, куда входят блуждающие токи, являются катодными и не подвергаются коррозии.

ХАРАКТЕР КОРРОЗИОННЫХ РАЗРУШЕНИЙ

По внешнему виду коррозионные разрушения весьма разнообразны (рис. 2).

Различают сплошную равномерную, сплошную неравномерную и местную (локальную) коррозию.

Сплошную равномерную коррозию от сплошной неравномерной отличает то, что она протекает с приблизительно одинаковой скоростью на всей поверхности металла, подверженной воздействию коррозионной среды. Как правило, равномерная коррозия протекает в результате дейст-

вия коррозионных микрогальванических элементов с неразделёнными анодными и катодными зонами.

Питтинговая коррозия – это локальная местная коррозия, при которой разрушение распространяется от поражённой точки поверхности в глубину в виде тонкого, часто сквозного, канала (рис. 2ж). При этом возникают коррозионные микрогальванические элементы с разделёнными анодными и катодными участками: анод располагается в питтинге, катод – на окружающей поверхности.

Избирательная (селективная) коррозия наблюдается при разрушении сплавов, когда компоненты сплава корродируют с разными скоростями. Наиболее известным примером избирательной коррозии является обесцинкование латуни*. При этом цинк избирательно растворяется, а пористый медный остаток теряет конструктивную прочность. Другими примерами является обезалюминивание бронзы** и селективное растворение олова из фосфористой бронзы.

Межкристаллитная коррозия – это коррозия в тонком пограничном слое между кристаллитами*** (рис. 2к), из которых обычно состоят металлы. После тепловой обработки при затвердевании металла протекают процессы, в результате которых в пограничной области кристаллита проявляются коррозионные свойства, отличные от свойств основной массы. Межкристаллитной коррозии при неблагоприятных условиях подвергается большинство металлов.

При послойной коррозии (рис. 5м) поражаются внутренние слои металла, подвергнутого обработке давлением. Поражение может привести к расслаиванию неповрежденных слоёв.

*Латуни – сплавы меди с цинком (3–5 %). По прочности превосходят медь и обычно не требуют специальной защиты от коррозии. Различают также алюминиевую латунь (0,4–2,5 % Al), никелевую (12–16,5 % Ni), оловянную (0,1–1,5 % Sn). Никелевая и оловянная латуни устойчивы к морской воде.

**Бронзы – сплавы на основе меди с небольшим содержанием цинка (до 3 %) или без него, алюминия, железа и никеля, марганца, кремния, олова, свинца, бериллия, титана и некоторых других металлов.

***Кристаллиты – беспорядочно ориентированные мелкие кристаллические зёрна.

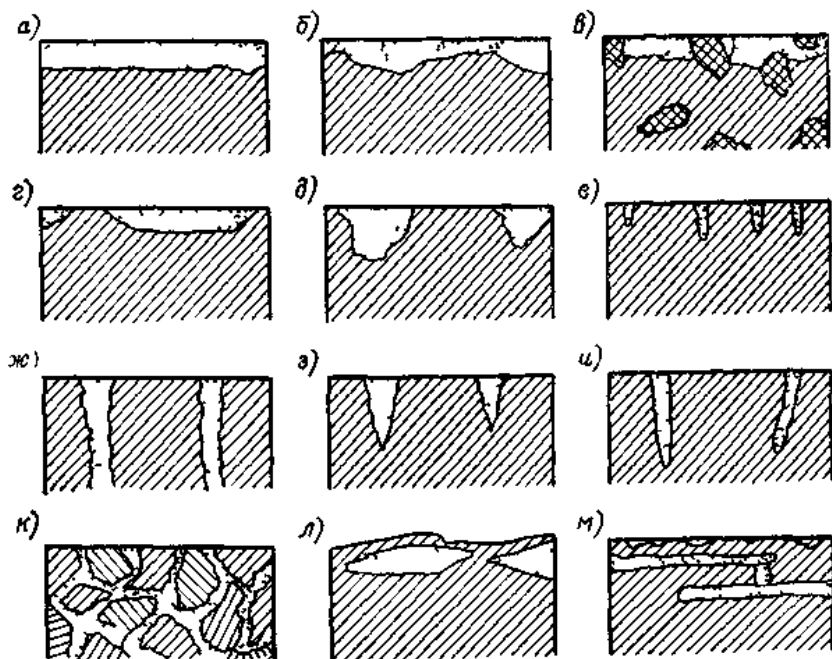


Рис. 2. Некоторые виды коррозионных разрушений:
а — равномерная, *б* — неравномерная, *в* — избирательная,
г — в виде пятен, *д* — язвенная, *е* — точечная, *ж* — сквозная,
з — ножевая, *и* — растрескивание, *к* — межкристаллитная,
л — подповерхностная, *м* — послойная.

СПОСОБЫ ЗАЩИТЫ ОТ КОРРОЗИИ

Защиту металлов от коррозии осуществляют по пяти направлениям:

- применение коррозионностойких материалов;
- использование металлических и неметаллических покрытий;
- электрохимическая защита;
- изменение свойств коррозионной среды;
- рациональное конструирование.

КОРРОЗИОННОСТОЙКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Коррозионностойкие материалы обладают повышенной стойкостью к коррозии и используются для изготовления деталей, узлов, аппаратов и конструкций, работающих в агрессивных средах без дополнительных мер защиты. Их подразделяют на металлические и неметаллические.

К металлическим материалам относят **коррозионностойкие сплавы, би- и полиметаллические материалы, композиции* с металлической матрицей.**

Из коррозионностойких сплавов наибольшее применение находят сплавы на основе железа (хромистые, хромоникелевые, хромомарганцевые и хромомарганцево-никелевые стали), сплавы алюминия (Al-Mg, Al-Mg-Zn), никеля, меди (латуни, бронзы), титана и некоторых других металлов. Коррозионная стойкость сплавов зависит от их химического состава и структуры, состояния поверхности, а также от конструктивных особенностей изделий и наличия в них механических напряжений.

Биметаллические материалы состоят из двух (иногда более) разнородных, прочно соединённых между собой металлов или сплавов. Их коррозионная стойкость определяется свойствами защитного (плакирующего**) слоя. К таким материалам относятся биметаллы медь – сталь, титан – сталь, нержавеющая сталь – конструкционная сталь. Биметаллические материалы применяют обычно для изготовления труб, листов и плит, работающих в агрессивных средах.

Композиционные материалы с металлической матрицей представляют собой сплавы никеля, титана и алюминия, упрочнённые нитевидными кристаллами бора, углерода, оксида алюминия, карбидами бора и кремния, волокнами молибдена или вольфрама. Коррозионная стойкость таких материалов определяется свойствами матрицы.

Неметаллические материалы по химическому составу подразделяют на материалы неорганического и органического происхождения. К неорганическим материалам относят горные породы, силикатные материалы, графит, керамику***; к органическим – полимерные материалы, в том числе, на основе каучука и резины.

*От лат. compositio – составление.

**От франц. plfguer – покрывать.

*** Керамика – материалы и изделия, получаемые спеканием глины и их смесей с минеральными добавками, а также оксидов металлов и других тугоплавких соединений.

ЗАЩИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ

Защитные покрытия подразделяют на *металлические, неметаллические и конверсионные*.

Металлические покрытия наносят на изделия погружением в расплавленный металл (горячий метод), термохимическим методом (плакирование), распылением (металлизация), диффузионным и гальваническим способами. В зависимости от применяемого металла покрытия бывают катодными и анодными. Если изделие покрывается металлом, имеющим более положительный электродный потенциал, чем потенциал защищаемого металла, то покрытие называют катодным. Например, покрытие из олова или меди на стального изделия. При нарушении целостности покрытия коррозия резко возрастает, так как металл изделия становится анодом по отношению к металлу покрытия (рис. 3.).

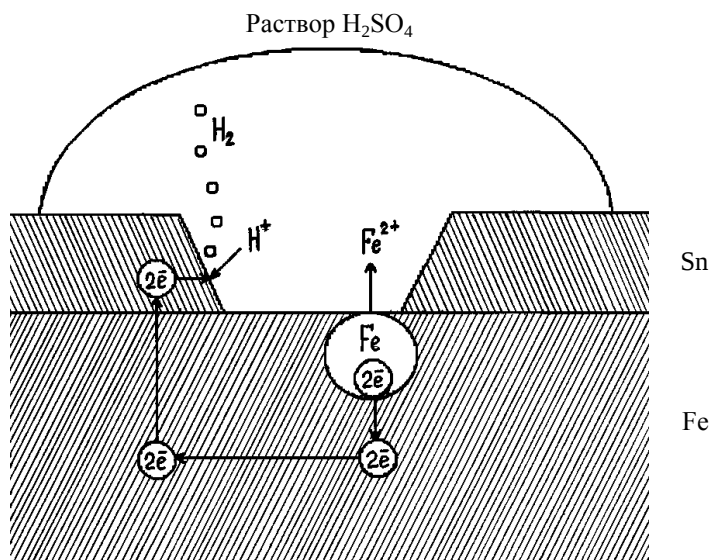
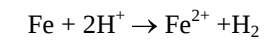
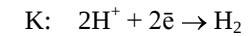
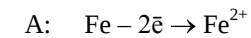
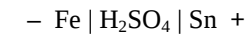


Рис. 3. Схема коррозии железа в кислой среде при нарушении (катодного) оловянного покрытия.

Процессы, протекающие при нарушении катодного покрытия:

$$\varphi^{\circ}_{\text{Sn}^{2+}/\text{Sn}} = -0,136\text{В}$$

$$\varphi^{\circ}_{\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}} = -0,440\text{В}$$



Если изделие покрывают металлом, имеющим более отрицательный электродный потенциал, чем потенциал металла защищаемого изделия, то такое покрытие называют анодным. Например, цинковое покрытие на стали. Анодное покрытие даже при нарушении его целостности продолжает защищать металл изделия, так как оно является анодом по отношению к защищаемому металлу (рис. 4.)

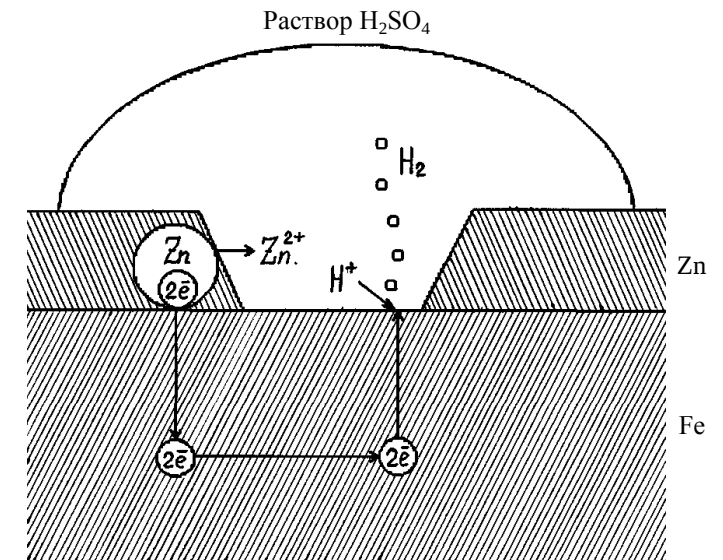


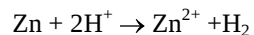
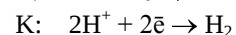
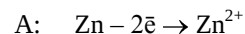
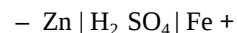
Рис. 4. Схема коррозии железа в кислой среде

при нарушении (анодного) цинкового покрытия.

Процессы, протекающие при нарушении анодного покрытия:

$$\varphi^{\circ}_{\text{Zn}^{2+}/\text{Zn}} = -0,763\text{В}$$

$$\varphi^{\circ}_{\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}} = -0,440\text{В}$$



Если катодное покрытие должно быть сплошным и непроницаемым для агрессивной среды, то к анодному покрытию, которое защищает электрохимически, требования по сплошности предъявляются менее высокие.

Из *неметаллических* защитных покрытий наиболее распространены эмали, лаки, краски, покрытия пластическими массами, резиной, смазками.

Конверсионными называют защитные покрытия, получаемые в результате химических реакций непосредственно на поверхности металла (фосфатирование, оксидирование, оксалатирование, анодирование и т. д.).

Фосфатирование поверхности осуществляют, нанося на стальную поверхность кистью, валиком или напылением холодные или горячие разбавленные растворы ортофосфатов марганца(II) или цинка ($\text{Mn}_3(\text{PO}_4)_2$, $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2$). При последующей реакции образуется сетка пористого кристаллического фосфата металла, прочно сцеплённая с поверхностью металла.

Оксидные покрытия на стали получают высокотемпературным окислением железа на воздухе или погружением изделия в горячий концентрированный раствор едкого натра NaOH, содержащий персульфат, нитрат или хлорат ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$, NaNO_3 или NaClO_3).

Оксидные покрытия на алюминии получают анодным окислением алюминия (анодирование) в соответствующем электролите, например разбавленном растворе серной кислоты при плотности тока не менее 100 А/м^2 .

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ЗАЩИТА

Различают два способа электрохимической защиты металлов от коррозии. Первый способ, обеспечивающий изменение направления тока в системе металл – электролит, называется **катодной защитой**. Вторым способом, затрудняющий или предотвращающий освобождение из металла электронов, называется **анодной защитой**. В общем случае под электрохимической защитой понимается перевод металла в нереакционное состояние путём электродной поляризации.

Катодная защита – способ предотвращения коррозии путем катодной поляризации металла со сдвигом его электродного потенциала в отрицательную сторону. Катодная защита сводится к тому, чтобы обеспечить на поверхности металла возможность протекания только (или преимущественно) катодных процессов. Основным критерием катодной защиты является защитный потенциал – электродный потенциал, при котором скорость окисления металла принимает предельно низкое значение, допустимое при данных условиях эксплуатации. При катодной защите отрицательный полюс внешнего источника тока присоединяют к защищаемой металлической конструкции, а положительный полюс – к вспомогательному электроду, работающему как анод. В процессе защиты последний разрушается и его периодически заменяют.

Анодная защита – способ ослабления коррозии путём анодной поляризации металла за счёт сдвига его электродного потенциала в положительную сторону до достижения пассивного состояния. В результате происходит значительное (в тысячи раз) уменьшение скорости коррозии. Такую защиту применяют для защиты оборудования, изготовленного из легко пассивирующихся материалов при эксплуатации в хорошо проводящих электрический ток средах.

Явление аномально резкого уменьшения скорости коррозии (на несколько порядков) в растворах сильных окислителей называют *пассивацией*, а возникающее при этом состояние металла — *пассивным*. Такое состояние относительно высокой коррозионной стойкости металла или сплава вызвано преимущественным торможением анодного процесса ионизации металла в определённой области электродных потенциалов, то есть высокая коррозионная стойкость проявляется в тех условиях, в которых с термодинамической точки зрения металл вполне коррозионно активен. Склонность металлов к пассивации различная. Так, например никель пассивируется легче железа. Некоторые металлы (алюминий, титан, магний) склонны к пассивации в растворах слабых окислителей, к каким относится речная вода.

Электрохимические способы защиты от коррозии осуществляются с помощью внешних источников постоянного тока или протекторов.

Способ с применением протекторов, называемый протекторной защитой, заключается в том, что к защищаемому объекту (резервуару хранилища, днищу корабля и т.п.), работающему в воде или во влажном грунте, прикрепляют металл с более отрицательным электродным потенциалом (протектор – ”жертвенный” анод), в результате чего в паре изделие – протектор объект становится катодом и не корродирует. В качестве материала протектора стальных изделий обычно применяют цинк или сплавы на основе магния или алюминия.

ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ КОРРОЗИОННОЙ СРЕДЫ

Изменение свойств коррозионной среды достигается уменьшением концентрации окислителей (например, деаэрацией воды в паровых котлах), созданием специальных защитных атмосфер (когда изделие эксплуатируется в ограниченном объеме), а также применением ингибиторов.

Согласно стандарту ISO 8044-1986 *ингибиторами коррозии называют химические соединения, которые, присутствуя в коррозионной системе в достаточной концентрации, уменьшают скорость коррозии без значительного изменения концентрации любого коррозионного реагента.*

Ингибиторами коррозии могут быть не только индивидуальные химические соединения, но и их композиции. Содержание ингибиторов в коррозионной среде обычно невелико.

Эффективность ингибиторов коррозии оценивают по степени защиты Z (в %) и коэффициенту торможения γ (ингибиторный эффект).

Степень защиты определяется по формулам:

$$Z = \frac{K_1 - K_2}{K_1} \cdot 100 = \frac{i_1 - i_2}{i_1} \cdot 100,$$

где K_1 и K_2 — скорость окислительного растворения металла в среде без ингибитора и с ингибитором соответственно $[\text{г/м}^2 \cdot \text{ч}]$;
 i_1 и i_2 – плотность тока коррозии металла в среде без ингибитора и с ингибитором соответственно $[\text{А/см}^2]$.

При полной защите коэффициент Z равен 100%.

Коэффициент торможения показывает, во сколько раз уменьшается скорость коррозии в результате действия ингибитора:

$$\gamma = \frac{K_1}{K_2} = \frac{i_1}{i_2}.$$

Z и γ связаны между собой соотношением:

$$Z = \left(1 - \frac{1}{\gamma}\right) \cdot 100,$$

$$\gamma = \frac{1}{1 - Z/100}.$$

КЛАССИФИКАЦИЯ ИНГИБИТОРОВ

По механизму действия ингибиторы подразделяют – на катодные, анодные и смешанные; по химической природе – на неорганические и органические; по кислотности среды – на кислотные, щелочные и ингибиторы для нейтральных сред.

Действие ингибиторов обусловлено изменением состояния поверхности металла вследствие адсорбции ингибитора или образованием с катионами металла практически нерастворимых соединений. Защитные слои, создаваемые ингибиторами, всегда тоньше наносимых защитных покрытий.

Катодные и анодные ингибиторы избирательно замедляют соответствующие электродные процессы, смешанные ингибиторы замедляют скорость обоих процессов. Адсорбция ингибитора и формирование на металлической поверхности защитного слоя обусловлено зарядом частиц ингибитора и их способностью образовывать с поверхностными атомами прочные химические связи.

Для лучшей защиты металлов от коррозии часто используют композиции ингибиторов. При этом может достигаться:

- аддитивность действия, когда ингибирующий эффект компонентов суммируется;
- антагонизм, когда одни компоненты ослабляют ингибирующий эффект других;
- синергизм, когда одни компоненты усиливают ингибирующий эффект других.

Неорганические ингибиторы коррозии. Способностью замедлять коррозию металлов обладают многие неорганические вещества. Их ингибирующее действие обуславливается некоторыми катионами (Ca^{2+} , Zn^{2+} , Ni^{2+} , As^{3+} , Bi^{3+} , Sb^{3+}) или анионами (CrO_4^{2-} , $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$, NO_2^- , SiO_3^{2-} , PO_4^{3-}).

Неорганические катодные ингибиторы уменьшают скорость коррозии металлов путём повышения перенапряжения катодного процесса или сокращения площадей катодных участков.

Так, *экранирующие катодные ингибиторы* образуют на микрокатадах защитные слои из практически нерастворимых соединений. Например, бикарбонат кальция $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ – самый дешёвый катодный экранирующий ингибитор, применяемый для защиты стальных труб системы водоснабжения – в подщелоченной воде образует практически нерастворимый карбонат кальция CaCO_3 , осаждающийся на поверхности и изолирующий (экранирующий) металл от электролита.

Катодные ингибиторы, повышающие перенапряжение катодного процесса, применяются в тех случаях, когда коррозия протекает с водородной деполяризацией. В качестве таких ингибиторов используют соли, содержащие катионы некоторых тяжёлых металлов. В результате восстановления происходит контактное осаждение этих металлов на стальной поверхности, вследствие чего повышается перенапряжение водорода.

Анодные неорганические ингибиторы коррозии образуют на поверхности металла тонкие ($\sim 0,01$ мкм) плёнки, которые замедляют процесс перехода ионов металла в раствор. В группу анодных ингибиторов коррозии включают и вещества – плёнообразователи, и окислители, часто называемые пассиваторами.

Плёнообразующие вещества защищают металл, создавая на его поверхности фазовые или адсорбционные плёнки. К ним относят едкий натр NaOH , соду Na_2CO_3 , фосфаты. Наибольшее распространение получили фосфаты, используемые для защиты стальных изделий в системе хозяйственных и коммунальных стоков.

Пассиваторы тормозят анодный процесс окислительного растворения металлов благодаря образованию на их поверхности оксидов.

Пассиваторы являются эффективными, но опасными ингибиторами. При неверно подобранной концентрации, в присутствии ионов Cl^- или при несоответствующей кислотности среды они могут, наоборот, ускорить коррозию металла, в частности, вызвать очень опасную точечную коррозию.

Органические ингибиторы коррозии. Способностью замедлять коррозию металлов обладают многие органические соединения. Как правило, – это ингибиторы смешанного действия, так как они воздействуют на скорость как катодного, так и анодного процессов.

Органические ингибиторы адсорбируются только поверхностью металла. Продукты коррозии их не адсорбируют. Поэтому их применяют при кислотном травлении металлов для очистки последних от ржавчины, окалины, накипи. Ингибиторами коррозии обычно являются азот-, ки-

слород- и серосодержащие алифатические и ароматические соединения (амины, меркаптаны, органические кислоты и их соли).

РАЦИОНАЛЬНОЕ КОНСТРУИРОВАНИЕ

Рациональное конструирование – это способ защиты металлических изделий, закладываемый при проектировании и заключающийся в повышении коррозионной устойчивости

- путём выбора стойкого в конкретных эксплуатационных условиях металла;
- путём исключения контакта разнородных металлов, способных образовывать макрогальванопары;
- за счёт конструкторских решений, устраняющих щелевую коррозию в узких зазорах и исключающих застойные зоны;
- за счёт снижения разрушающего действия потока коррозионной среды.

ТИПОВЫЕ ЗАДАЧИ

Пример 1.

Что происходит на контактирующих пластинках из олова и висмута при атмосферной коррозии ? Определите, какая из пластинок будет служить катодом, а какая – анодом ?

Решение.

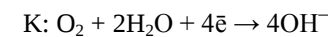
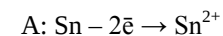
Стандартные электродные потенциалы олова и висмута (см. Приложение) равны :

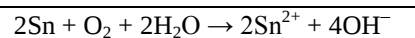
$$\varphi^{\circ} \text{Sn}^{2+} / \text{Sn} = -0,136 \text{ В},$$

$$\varphi^{\circ} \text{Bi}^{3+} / \text{Bi} = +0,200 \text{ В}.$$

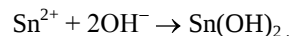
Поскольку стандартный электродный потенциал висмута больше, то, при контакте этих металлов олово будет служить анодом, а висмут – катодом.

При атмосферной коррозии протекают следующие процессы:





Первичные продукты коррозии (Sn^{2+} и OH^-), взаимодействуя между собой, приводят к образованию гидроксида олова (II) по уравнению



Пример 2.

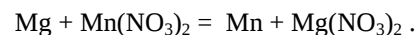
Пластинки из магния и никеля опустили в водный раствор нитрата марганца. Что происходит на каждой из этих пластинок? Какие процессы будут происходить на пластинках, если их наружные концы соединить металлическим проводником?

Решение.

Выписываем значения стандартных электродных потенциалов металлов из таблицы (см. Приложение):

$$\begin{aligned}\varphi^\circ \text{Mg}^{2+} / \text{Mg} &= -2,363\text{В}, \\ \varphi^\circ \text{Ni}^{2+} / \text{Ni} &= -0,250\text{В}, \\ \varphi^\circ \text{Mn}^{2+} / \text{Mn} &= -1,180\text{В}.\end{aligned}$$

Так как стандартный электродный потенциал магния меньше, чем электродный потенциал марганца, то магний будет вытеснять марганец из раствора его соли по уравнению

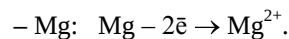


Следовательно, на поверхности магниевой пластинки появится слой марганца.

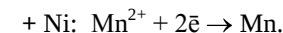
Стандартный электродный потенциал никеля, наоборот, больше, чем марганца, поэтому никель не сможет восстановить ионы марганца из раствора его соли.

Если наружные концы пластинок из магния и никеля соединить металлическим проводником, то образуется гальваническая пара, в которой анодом будет служить магниевая пластинка, а катодом – никелевая.

Анод – магний будет окисляться:



Электроны по наружному проводнику потекут на никелевую пластинку, и на ней будет происходить восстановление окислителя – ионов Mn^{2+} :



Следовательно, магниевая пластинка будет разрушаться за счёт окислительного растворения, а на никелевой будет выделяться металлический марганец.

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

1. Рассмотрите коррозионные процессы, протекающие на железной пластинке в кислой среде при нарушении целостности никелевого покрытия. Составьте электронные уравнения электродных процессов.
2. Составьте электронные уравнения анодного и катодного процессов при коррозии пары марганец – цинк во влажной атмосфере. Определите первичные и вторичные продукты коррозии.
3. Какой металл будет более эффективным протектором свинцовой оболочки электрического кабеля: цинк, хром или магний? Почему? Напишите уравнения электродных процессов и определите состав продуктов при атмосферной коррозии.
4. На железное изделие нанесён слой золота. Определите тип покрытия и рассмотрите механизм защиты основного металла при появлении глубокого дефекта (царапины) на изделии. Составьте электронные уравнения анодного и катодного процессов, происходящих в кислой среде.
5. Возможна ли коррозия серебра в условиях влажной атмосферы? Дайте подробный ответ.
6. Химически чистое железо более стойко к коррозии, чем техническое. Почему? Охарактеризуйте процессы, которые происходят при атмосферной коррозии технического железа?
7. На железное изделие нанесён слой серебра. Какое это покрытие – анодное или катодное? Обоснуйте ответ. Какие процессы будут происходить при повреждении покрытия в кислой среде? Составьте электронные уравнения этих процессов.

8. Лужёная медь контактирует с влажным воздухом. Будет ли корродировать медь, если нарушить оловянное покрытие ? Обоснуйте ответ. Напишите электронные уравнения происходящих при этом электродных процессов.
9. Почему серебро не вытесняет водород из разбавленных кислот ? Однако, если серебряной проволоочкой коснуться гранулы цинка, помещённой в кислоту, то на проволочке наблюдается бурное выделение газа. Дайте этому факту объяснение. Напишите электронные уравнения происходящих при этом анодного и катодного процессов.
10. Определите анодный и катодный процессы при коррозии пары марганец – хром в кислой среде. Напишите электронные уравнения.
11. Составьте электронные уравнения анодного и катодного процессов с кислородной и водородной деполяризацией при коррозии пары алюминий – цинк. Определите конечные продукты коррозии в обоих случаях.
12. На железную пластинку нанесли каплю воды. После того, как вода на воздухе высохла, на месте капли обнаружили следы ржавчины. Где они располагались: по периметру капли или ближе к её центру ? Почему ? Дайте подробные пояснения. Напишите электронные уравнения происходящих процессов.

Стандартные электродные потенциалы

Электродная полуреакция	E° , В
$\text{Li}^{+} + \bar{e} \rightleftharpoons \text{Li}$	-3,045
$\text{Rb}^{+} + \bar{e} \rightleftharpoons \text{Rb}$	-2,925
$\text{K}^{+} + \bar{e} \rightleftharpoons \text{K}$	-2,925
$\text{Cs}^{+} + \bar{e} \rightleftharpoons \text{Cs}$	-2,923
$\text{Ba}^{2+} + 2\bar{e} \rightleftharpoons \text{Ba}$	-2,906
$\text{Ca}^{2+} + 2\bar{e} \rightleftharpoons \text{Ca}$	-2,866
$\text{Na}^{+} + \bar{e} \rightleftharpoons \text{Na}$	-2,714
$\text{Mg}^{2+} + 2\bar{e} \rightleftharpoons \text{Mg}$	-2,363
$\text{Al}^{3+} + 3\bar{e} \rightleftharpoons \text{Al}$	-1,662
$\text{Mn}^{2+} + 2\bar{e} \rightleftharpoons \text{Mn}$	-1,180
$\text{Zn}^{2+} + 2\bar{e} \rightleftharpoons \text{Zn}$	-0,763
$\text{Cr}^{3+} + 3\bar{e} \rightleftharpoons \text{Cr}$	-0,744
$\text{Fe}^{2+} + 2\bar{e} \rightleftharpoons \text{Fe}$	-0,440
$\text{Cd}^{2+} + 2\bar{e} \rightleftharpoons \text{Cd}$	-0,403
$\text{Co}^{2+} + 2\bar{e} \rightleftharpoons \text{Co}$	-0,277
$\text{Ni}^{2+} + 2\bar{e} \rightleftharpoons \text{Ni}$	-0,250
$\text{Sn}^{2+} + 2\bar{e} \rightleftharpoons \text{Sn}$	-0,136
$\text{Pb}^{2+} + 2\bar{e} \rightleftharpoons \text{Pb}$	-0,126
$2\text{H}^{+} + 2\bar{e} \rightleftharpoons \text{H}_2$	0
$\text{Bi}^{3+} + 3\bar{e} \rightleftharpoons \text{Bi}$	+0,200
$\text{Sb}^{3+} + 3\bar{e} \rightleftharpoons \text{Sb}$	+0,240
$\text{Cu}^{2+} + 2\bar{e} \rightleftharpoons \text{Cu}$	+0,337
$\text{Hg}_2^{2+} + 2\bar{e} \rightleftharpoons 2\text{Hg}$	+0,788
$\text{Ag}^{+} + \bar{e} \rightleftharpoons \text{Ag}$	+0,799
$\text{Hg}^{2+} + 2\bar{e} \rightleftharpoons \text{Hg}$	+0,854
$\text{Pt}^{2+} + 2\bar{e} \rightleftharpoons \text{Pt}$	+1,200
$\text{Au}^{3+} + 3\bar{e} \rightleftharpoons \text{Au}$	+1,498

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Глинка Н.Л. Общая химия: Учеб. пособие для вузов. / Под ред. А.И. Ермакова. – М.: Интеграл-Пресс, 2005.
2. Фролов В.В. Химия: Учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. шк., 1979.
3. Романцева Л.М., Лещинская З.Л., Суханова В.А. Сборник задач и упражнений по общей химии. – М.: Высш. шк., 1991.

Дополнительная

4. Жук Н.П. Курс теории коррозии и защиты металлов: Учеб. пособие. - М.: Металлургия, 1976.
5. Шлугер М.А., Ажогин Ф.Ф., Ефимов Е.А. Курс коррозии и защиты металлов: Учеб. пособие. - М.: Металлургия, 1981.
6. Томашов Н.Д., Чернова Г. П. Теория коррозии и коррозионностойкие материалы. - М.: Металлургия, 1986.
7. Мамулова Н.С., Сухотин А.М., Сухотина Л.П., Флорианович Г.М., Яковлев А.Д. Все о коррозии: Справочник. - С-Пб.: Химиздат, 2000.
8. Семёнова Н.Ф., Флорианович Г.М., Хорошилов А.В. Коррозия и защита от коррозии.– М.: Физматмет, 2002.
9. Старкова Н.Н., Рябухин Ю.И. Электрохимия. Ч. I. Гальванические элементы: Учеб. пособие по общей химии. – Астрахан. гос. техн. ун-т.– Астрахань, 2006.–3...с.

Содержание

Введение

Скорость коррозии

Химическая коррозия

Электрохимическая коррозия

Некоторые виды электрохимической коррозии

Характер коррозионных разрушений

Способы защиты от коррозии

Коррозионностойкие материалы

Защитные покрытия

Электрохимическая защита

Изменение свойств коррозионной среды

Рациональное конструирование

Типовые задачи

Задачи для самостоятельного решения

Приложение

Литература

