

3. ТЕОРИЯ КОРРОЗИИ.	3-2
Цели и задачи раздела.	3-2
Основные термины.	3-2
3.1. Коррозия и борьба с ней.	3-2
3.1.1. Коррозия.	3-2
3.1.2. Превращение металлов в природе.	3-4
3.1.3. Коррозия как электрохимический процесс.	3-5
3.1.3.1. Анод.	3-6
3.1.3.2. Катод.	3-6
3.1.3.3. Обратная цепь (путь по металлу).	3-6
3.1.3.4. Электролит.	3-6
3.1.3.5. Выводы.	3-7
3.1.4. Коррозия стальных конструкций.	3-7
3.1.5. Этапы окислительно-восстановительной реакции коррозии железа.	3-8
3.1.6. Прокатная окалина.	3-8
3.1.7. Гальванический ряд металлов.	3-9
3.1.8. Окружающая среда и коррозия.	3-11
3.1.8.1. Факторы, влияющие на скорость коррозии.	3-11
3.1.8.2. Типы окружающей среды по степени увлажнения поверхности.	3-13
3.1.8.3. Атмосферно-коррозионные категории среды.	3-14
3.1.8.4. Методология классификации атмосферно-коррозионной категории среды (ISO 9223).	3-17
3.1.8.5. Коррозия в воде и почве.	3-17
3.2. Виды коррозии.	3-19
3.2.1. Формы коррозии на различных материалах.	3-19
3.2.2. Сплошная коррозия.	3-20
3.2.3. Местная коррозия.	3-21
3.2.3.1. Питтинговая коррозия.	3-21
3.2.3.2. Межкристаллитная коррозия.	3-21
3.2.3.3. Щелевая коррозия.	3-22
3.2.3.4. Эрозионная коррозия.	3-23
3.2.3.5. Кавитационная коррозия.	3-24
3.2.3.6. Гальваническая коррозия.	3-25
3.2.3.7. Коррозионно-механическое растрескивание.	3-26
3.2.3.8. Коррозионная усталость.	3-27
3.2.4. Уровень значимости различных видов коррозии.	3-28
3.3. Коррозия и ее последствия.	3-28
3.3.1. Экономические последствия коррозии.	3-28
3.3.2. Последствия коррозии – надежность и безопасность.	3-29
3.3.3. Последствия коррозии – внешний вид.	3-29
3.4. Защита от коррозии.	3-29
3.4.1. Конструкторские решения.	3-30
3.4.2. Ингибиторы коррозии.	3-30
3.4.3. Системы катодной защиты.	3-30
3.4.4. Системы защитных покрытий.	3-31
3.4.5. Выбор конструкционных материалов.	3-31
3.4.6. Изменение окружающей среды.	3-31
3.5. Программа борьбы с коррозией.	3-32
Основные термины и определения.	3-33
Руководство по изучению раздела.	3-35

3. ТЕОРИЯ КОРРОЗИИ.

Цели и задачи.

После изучения данной главы, специалист должен иметь знание и понимание:

- Основные сведения о коррозии;
- Виды коррозии;
- Воздействие коррозии;
- Контроль коррозии;
- Антикоррозионные программы.

Основные термины.

Предполагаемый срок службы антикоррозионной системы представляет собой запроектированную ее экономическую стоимость путем обеспечения защиты от коррозии

- Коррозия;
- Пассивация;
- Коррозионный элемент;
- Анод;
- Катод;
- Путь возврата;
- Электролит;
- Прокатная окалина;
- Гальванический ряд;
- Общая коррозия;
- Локальная коррозия;
- Точечная коррозия;
- Щелевая коррозия;
- Ингибитор коррозии;
- Катодная защита.

3.1. Коррозия и борьба с ней.

3.1.1. Коррозия.

Коррозия материала – это самопроизвольное разрушение любого материала, будь то металл, бетон, дерево или полимер в результате химического или физико-химического взаимодействия с окружающей средой. Применительно к дереву применяется понятие «гниение», а к полимерам – «старение».

Термином "коррозия" металлов пользовались, подразумевая процесс, результаты процесса и вызываемые процессом повреждения. В международном стандарте ISO-8044 «Коррозия металлов и сплавов – общие термины и положения» под коррозией понимается процесс.

Коррозия металлов – физико-химическое взаимодействие между металлом и средой, в результате которого изменяются свойства металла и которое может привести к серьезному ухудшению функциональных характеристик металла, среды, или включающей их технической системы.

Для сплавов железа (сталей) часто используют термин «ржавление».

Любой наблюдаемый результат коррозии в любой части коррозионной системы обозначается термином «**коррозионный эффект**» или «**коррозионное разрушение**».

Коррозионная система – система, включающая один или более металлов и все части среды, которые могут влиять на коррозию.

Термин "**коррозионная порча**" охватывает любое ухудшение функциональных характеристик технической системы, частями которой могут быть металл и среда.

Как следствие этого, и в термине "**защита от коррозии**" подразумевается главная задача - избежать коррозионной порчи, а не предотвратить коррозию, что во многих случаях невозможно, а иногда и не нужно.

По механизму взаимодействия с внешней средой (по природе разрушения) коррозионные процессы металлов различают:

– **Химическую коррозию** – это вид коррозионного разрушения металла, связанный с взаимодействием металла и коррозионной среды, при котором одновременно окисляется металл и происходит восстановление коррозионной среды.

Химическая коррозия, как правило, вызвана воздействием на сталь сухих газов (газовая коррозия) и жидкостей-неэлектролитов и не сопровождается возникновением электрических токов.

– **Газовую коррозию** – разновидность химической коррозии металла в газах при высоких температурах. Примером газовой коррозии является образование прокатной окалины на поверхности горячекатаной стали.

При таком виде коррозии происходит равномерное воздействие на всю поверхность металла, в результате чего появляются окислы в виде рыхлых или твердых образований. Химическая коррозия представляет менее опасный вид разрушающих воздействий, в отличие от электрохимической коррозии.

– **Электрохимическую коррозию** – взаимодействие металла с коррозионной средой (раствором электролита), при котором ионизация атомов металла и восстановление окислительной компоненты коррозионной среды протекают не в одном акте и их скорости зависят от электродного потенциала.

Все металлы и сплавы обладают электрическим потенциалом, из-за наличия в составе сплавов тех или иных веществ их потенциал не однороден. Если взять два материала с разными потенциалами и соединить их между собой, то они образуют гальваническую пару. Поместив такую пару в электролит, между ними начинается активный электрообмен, что приводит к ускоренному разрушению более активного материала.

– **Биокоррозию** – процесс разрушения металлов под влиянием живых организмов (водорослей, моллюсков, бактерий, дрожжей, грибов), находящихся в водной среде и грунте.

Процесс биокоррозии имеет сложный механизм. Живые микроорганизмы могут разрушать поверхность непосредственно, а также стимулировать появление и протекание коррозии.

Наибольшего ущерба биологическая коррозия наносит нефтяной и газодобывающей промышленности, морскому флоту и трубопроводам, конструкциям водоснабжения, средствам коммуникаций. Более 70% коррозионных процессов становятся биоразрушениями. Наиболее часто микроорганизмы провоцируют разрушения на алюминии, стали, цинке, магнии. Медь, свинец, никель очень стойки к биологическим разрушениям.

Биокоррозия может существовать как отдельный самостоятельный вид, но чаще всего процесс разрушения происходит параллельно с химической или электрохимической коррозией.

– **Электрокоррозию** – усиление коррозии под действием анодной поляризации, вызванной действием электрического внешнего источника тока (**коррозия внешним током**) или внешним электрическим полем вне предусмотренных цепей (**коррозия блуждающими токами**).

В общем случае электрокоррозия является разновидностью электрохимической коррозии.

Коррозия сталей обычно описывается ее результатами. Привычные термины коррозии сталей включают: ржавчина, изменение цвета, разъедание, окисление, пластовая ржавчина, точечная коррозия и т.д. Эти описательные термины базируются на легко наблюдаемых характеристиках результатов процесса коррозии и ее продуктов.

Сам процесс коррозии менее заметен. С целью более глубокого понимания процесса коррозии проводятся его исследования. Знание процесса коррозии необходимо для того, чтобы должным образом выявить и разобраться с ее внешними проявлениями и обоснованно и эффективно вести борьбу с коррозией.

В этом разделе рассматривается сталь как самый распространенный материал, используемый в строительстве. Сталь, в свою очередь, состоит в основном из железа (Fe), приблизительно на 95%. Из всех видов коррозии строительных материалов ухудшение состояния железа наносит наибольший экономический ущерб промышленности. Хотя сталь кроме железа содержит другие элементы, некоторые из которых сильно влияют на коррозионную устойчивость, здесь не будут учитываться.

3.1.2. Превращение металлов в природе.

В химическом равновесии с природой железная руда является оксидом железа. Когда из железной руды с затратами большого количества энергии выплавляют железо, химический баланс нарушается и железо становится активным (рисунок 3.1.).

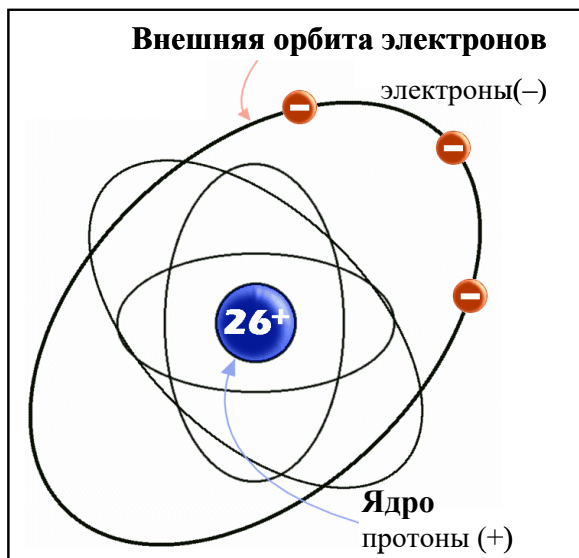


Рисунок 3.1. – Планетарная модель строения атома железа (Fe).

Активное железо корродирует при контакте с окружающей средой и пытается вернуть свое обычное природное инертное состояние. Два или все три электрона на орбите атома железа могут легко сойти с внешней оболочки, тогда железо становится двухвалентным (железистым) (Fe^{+2}) или трёхвалентным (Fe^{+3}).

Ионы железа, соединяясь с кислородом, превращается в монооксид железа(II) FeO (минерал вюстит), оксид железа(III) Fe_2O_3 (минерал гематит) и сложный оксид железа (II,III) Fe_3O_4 , одновременно содержащий ионы железа(II) и железа(III) (минерал магнетит).

В процессе окисления железа конструктивная сталь теряет толщину и вес, что в конечном итоге может привести к потере конструкцией ее несущей способности.

Выявлять и контролировать процесс коррозии (выполнять антикоррозионную защиту) гораздо проще, когда понимается:

- Процесс корродирования металла;
- Скорость протекания процесса коррозии;
- Факторы, влияющие на скорость протекания коррозии.

Сталь является не единственным конструкционным металлом, используемым в строительстве. Кроме стали обычно используются:

- Медь;
- Латунь;
- Цинк (в качестве покрытия на стали);
- Алюминий;
- Никель, хром (в качестве основной легирующей добавки в «нержавеющие стали»).

Коррозии этих металлов протекает по таким же принципам, как и для стали. Однако, их коррозия может протекать более медленно, что обусловлено образованием на их поверхности плотно прилегающего поверхностного слоя, сформированного из продуктов соединений этих металлов (оксид, карбонат, хлорид, сульфат, или другое соединение).

Формирование этого поверхностного слоя, хотя и относительно тонкого, может образовывать эффективный барьер против дальнейшего воздействия среды, и, таким образом, замедлить скорость процесса коррозии. Это явление известно как пассивации.

Концентрированные неорганические кислоты (до 70%), такие как азотная (HNO_3) и серная (H_2SO_4) способны пассивировать железо, не растворяя его. Пассивация железа – это образование на поверхности металла прочной защитной оксидной пленки под воздействием сильных концентрированных кислот.

К сожалению, в морских средах, одно только железо не образует такой барьер.

3.1.3. Коррозия как электрохимический процесс.

Вся коррозия железа при нормальных условиях окружающей среды представляет собой электрохимический процесс. Это означает, что ионы и электроны проходят по поверхности, которая генерирует ток (коррозионный ток). Причем, коррозионный ток проводят как электроны (через металлический проводник), так и ионы (через электролит).

Коррозия устанавливается в виде замкнутых цепей постоянного тока. Соотношения между параметрами в цепи постоянного тока определяется законом Ома:

$$E = IR,$$

где E – рабочее напряжение в цепи;
 I – сила тока;
 R – сопротивление цепи.

Чем больше коррозионный ток в цепи, тем больше потери металла.

Рисунок 3.2 иллюстрирует процесс коррозии на примере обычного сухозаряженного гальванического элемента, в котором электроэнергия генерируется по принципу электрохимической коррозии. Гальванический элемент состоит из четырех составляющих компонентов:

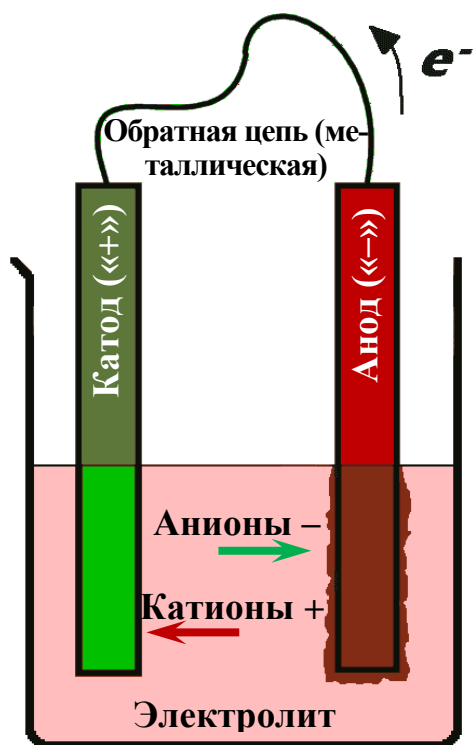


Рисунок 3.3. – Схема коррозионного элемента

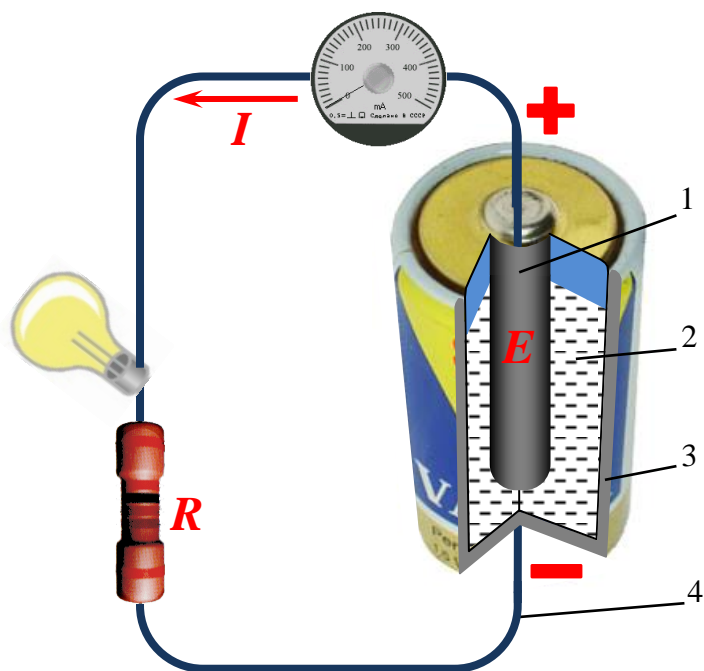


Рисунок 3.2. – Схема сухозаряженного гальванического элемента: 1 – графитовый электрод («+»); 2 – электролит; 3 – цинковый стакан («-»); 4 – электропровод.

- Электролит (влажная паста из хлорида аммония и хлорида цинка);
- Отрицательный электрод (цинковый стакан), что соответствует аноду в коррозионном элементе;
- Положительный электрод (графитовый стержень), который соответствует катоду в коррозионном элементе;
- Электропровод, соответствующий металлическому мостику в коррозионном элементе.

Подобные же составные части присутствуют и в коррозионном элементе (рисунок 3.3). Два металла, находящиеся в контакте друг с другом и имеющие разные электродные потенциалы, образуют в электролите

гальванический элемент, работа которого влияет на скорость коррозии каждого из этих металлов. Коррозия более электроотрицательного металла увеличивается, а более электроположительного металла ослабляется.

Для того, чтобы происходила коррозия металла обязательно должны присутствовать следующие элементы:

- Анод;
- Катод;
- Обратная цепь (внешний проводник);
- Электролит.

Все вместе они составляют коррозионный элемент.

Коррозионный элемент – это гальванический элемент, возникающий при взаимодействии металла и среды, влияющей на скорость и характер коррозии металла.

3.1.3.1. Анод.

С точки зрения коррозионного процесса анодом является та часть металла, которая имеет меньшую величину электродного потенциала. Анод подвергается коррозии (разлагается в электролите). На аноде происходит окисление металла. Металл, растворяясь в электролите, превращается в положительно заряженные ионы (катионы). В процессе окисления металла на аноде генерируются избыточные электроны, которые по металлической цепи переходят на катод.

3.1.3.2. Катод.

В коррозионном процессе катод – это полюс гальванической пары, противоположный аноду, т.е. электрод с положительным потенциалом, куда переходят электроны.

На катоде проходит реакция, которая, как правило, ионизирует электролит с образованием продуктов, таких как водород (с выделением газа) и ионов гидроксила.

В то время как на аноде происходит окисление, на катоде происходит восстановление, на катоде потребляются избыточные электроны.

Окислительно-восстановительная реакция всегда происходит совместно. Анод и катод имеют разные потенциалы, создавая разность потенциалов между ними. Потенциалы являются функцией химических и физических состояний. Разность потенциалов является движущей силой процесса коррозии.

3.1.3.3. Обратная цепь (путь по металлу).

Обратный путь соединяет анод и катод и обеспечивает прохождение электронов, генерируемых на аноде, к катоду. Когда коррозия происходит на поверхности металла, всегда есть соединения металлических путей анода (анодные участки) с катодом (катодные участки). Без соединений металлических путей реакция коррозии не может происходить.

3.1.3.4. Электролит.

Электролит представляет собой среду, которая проводит ионный (но не электронный) ток. Большинство электролитов основаны на воде. Электролит содержит ионы, которые несут положительный (катионы) или отрицательный (анионы) заряд. Для того, чтобы протекали реакции окисления и восстановления, требуется путь для транспортирования ионов между анодом и катодом. Электролит необходим для того, чтобы "замкнуть цепь" в коррозионном элементе. Коррозионный ток проходит путем перемещения ионов через электролит. Анионы притягиваются к аноду, а катионы – к катоду, где они могут быть объединены с продуктами окисления и восстановления.

3.1.3.5. Выводы.

Все четыре из вышеуказанных компонентов (анод, катод, обратная цепь, и электролит) должны присутствовать для того, чтобы происходила коррозия. Отсутствие хотя бы одного из них предотвращает возникновение коррозии, но на практике нейтрализовать их не всегда удастся. Попытка удалить какой-нибудь из этих элементов называют борьбой с коррозией. На большинстве конструкций анод и катод может располагаться в разных местах, сама конструкция является обратной цепью, а вода служит в качестве электролита.

3.1.4. Коррозия стальных конструкций.

Стальная конструкция начинает корродировать, когда присутствуют все четыре из вышеуказанных компонентов коррозионного элемента (анод, катод, обратная цепь, и электролит). Сталь обеспечивает металлический путь и проводит электрический ток, образуя множество анодных и катодных участков вследствие электрической разности потенциалов, а затем растворяется, когда она вступает в контакт с электролитом.

Коррозия представляется как результат работы большого количества коррозионных гальванических элементов.

Поверхность стали не является совершенно однородным металлом. Она содержит элементы примесей. К тому же в кристаллической решетке существуют напряжения и дефекты, которые являются результатом механической обработки металла. Таким образом, на поверхности металла существует множество крошечных анодных и катодных участков с различными электродными потенциалами (см. рисунок 3.4-а). Причем достаточно, чтобы разность их потенциалов была совсем незначительной.

Таким образом, сталь сама по себе имеет три из четырех элементов, необходимых для создания коррозионного элемента: анод, катод и обратную цепь. Для начала коррозионного процесса не хватает электролита.

Вода в чистом виде является очень плохим электролитом, но если в воде присутствуют химические соли (например, хлорид натрия в морской среде), они легко растворяются в воде, создавая электролит, который становится более эффективным, так как концентрация растворенных химических веществ увеличивается.

Хлорид натрия присутствует не только в морской среде, но и в подтоварной воде при добыче и переработке нефти и газа, в антиобледеняющих солях, используемых на многих автодорогах, путепроводах и мостах. Другие химические соли включают сульфаты, получаемые из сернистых про-

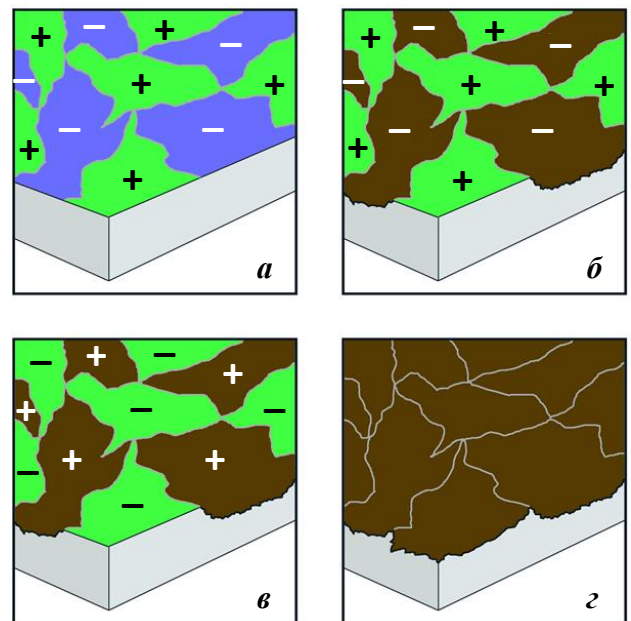


Рисунок 3.4. – Анодные и катодные микроучастки на стальной поверхности:
а – поверхность, не тронутая коррозией;
б – корродирование анодных участков;
в – изменение полярности анодов и катодов;
г – сплошная коррозия поверхности.

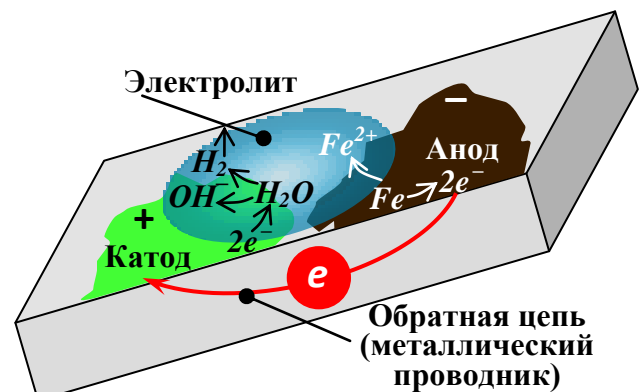


Рисунок 3.5. – Схема коррозионного элемента на поверхности стали.

дуктов промышленного сгорания.

В присутствии электролита анодные и катодные участки образуют множество коррозионных элементов (рисунок 3.5).

Анодные участки поверхности теряют свои электроны и позволяют быстро формироваться продуктам коррозии (см. рисунок 3.4-б).

Когда анодные участки поржавеют, их поверхность станет более инертной и полярности поменяются местами. Участки, которые когда-то были анодными, становятся катодными, а участки, которые когда-то были катодными, становятся анодными (см. рисунок 3.4-в).

В конечном итоге, вся поверхность стали поржавеет (см. рисунок 3.4-г). Однако это не означает, что на этом процесс коррозии останавливается, поскольку под поверхностью продуктов коррозии полярность участков вновь перераспределится, и пока будут существовать четыре компонента коррозионного элемента (анод, катод, обратная цепь, и электролит), процесс коррозии будет продолжаться.

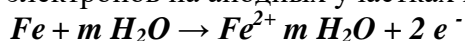
Если аноды и катоды остаются на одном и том же самом месте в течение определенного периода времени, коррозия происходит на определенном месте анодного участка, таким образом, образуя точечную коррозию. Когда сформируется кратер точечной коррозии, анод коррозионного элемента фиксируется в кратере, и скорость коррозии ускоряется в одной конкретной точке. В результате точечная коррозия часто разрушает металл насквозь.

3.1.5. Этапы окислительно-восстановительной реакции коррозии железа.

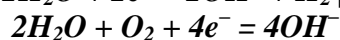
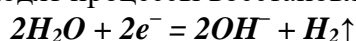
Электрохимическая коррозия металлов (ржавление) вызывается окислительно-восстановительными реакциями, протекающими на границе металла и окружающей среды в результате работы большого количества микроскопических гальванических элементов.

Процесс самой распространенной электрохимической коррозии, который протекает в воде или влажном воздухе, включает следующие этапы:

1. На анодных участках железо отдает электроны (окисляется), растворяясь в воде. Происходит анодная реакция – ионизация атомов железа с образованием гидратированных ионов в воде и некомпенсированных электронов на анодных участках металла:



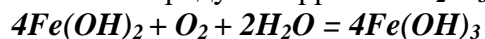
2. Появившиеся на анодных участках электроны по поверхности металла перетекают к катодным участкам, где принимаются окислителем. Возникает коррозионный электрический ток. На катодных участках происходят процессы восстановления воды и кислорода:



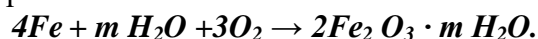
3. Поскольку анодные и катодные участки являются короткозамкнутыми, то для работы таких микрогальванопар достаточно наличие тончайшей пленки влаги, конденсирующейся на поверхности металла в атмосферных условиях, которая выступает в роли электролита. В растворе электролита образуется гидрат закиси железа:



4. Доокисление растворимого в воде гидрата окиси железа $Fe(OH)_2$ в нерастворимый $Fe(OH)_3$ и превращение его в конечный продукт коррозии Fe_2O_3 :



Суммарная реакция коррозии:



3.1.6. Прокатная окалина.

Прокатную окалину можно увидеть на поверхности новой стали в виде сине-черных слоев оксида железа. Окалина образуется при производстве стали, когда горячая сталь вступает в

контакт с воздухом. Окалина является оксидом железа и состоит из трех слоев: FeO , что ближе всего к стали, Fe_3O_4 и Fe_2O_3 снаружи. Эти 3 слоя имеют обычно общую толщину 25-100 мкм.

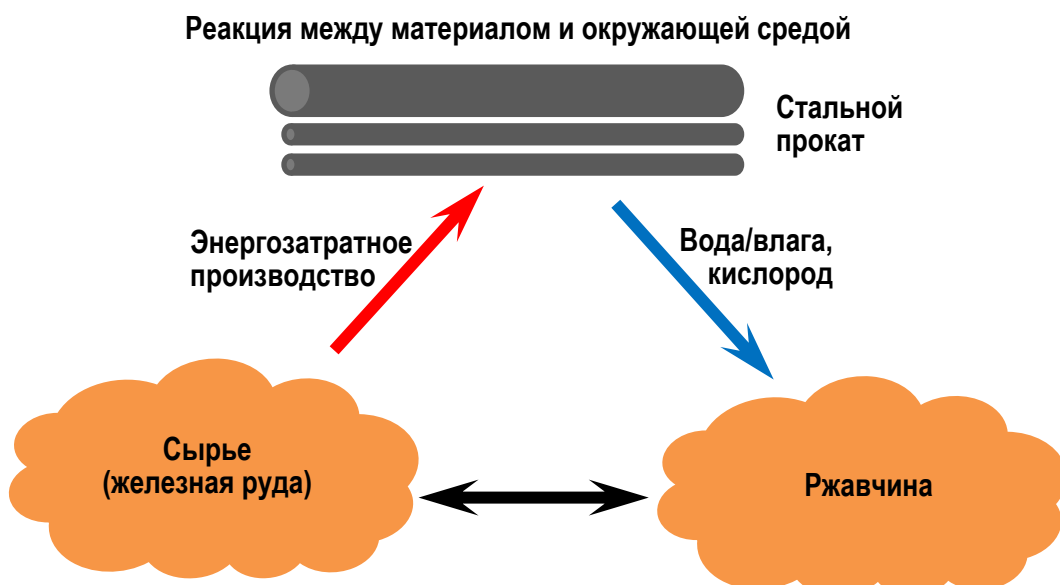
Окалина имеет электрически положительный потенциал по отношению к железу или стали, поэтому она является катодом по отношению к стали. В коррозионном элементе в присутствии влаги, прокатная окалина способствует образованию коррозии на анодных оголенных участках стали. Поэтому прокатную окалину, как правило, необходимо удалять перед нанесением покрытия для того, чтобы не покрыть активные коррозионные элементы и чтобы не образовывалась коррозия под пленкой защитного покрытия.

3.1.7. Гальванический ряд металлов.

Известно, что некоторые материалы под воздействием окружающей среды ржавеют быстрее, чем другие. Например, углеродистая сталь быстро ржавеет в морской воде, в то время как золото является инертным. Почему они ведут себя так по-разному?

Объяснение можно найти, взглянув на энергетические уровни различных материалов. Практически все находятся на самом низком энергетическом уровне. Большинство металлов в природном состоянии встречаются в виде минералов, оксидов или других соединений, а никак не в виде металлов или сплавов, которые мы используем в строительных целях. В природе существует только несколько чистых металлов. Эти металлы называют "Благородными металлами" и им не нужно проходить процесс энергозатратной очистки или переработки перед применением. Таким образом, уровень энергии благородных металлов почти тот же, что и уровень их наиболее стабильной формы, встречающейся в природе.

Для магния, цинка, алюминия, чугуна и стали, ситуация совсем иная. Эти металлы (или их сплавы) не найдены в природе. Например, чугун и сталь извлечены из железной руды в доменной печи или электропечи, где железная руда вместе с углем или коксом нагрета до очень высокой температуры. Для получения чугуна или стали используется большое количество энергии. Таким образом, уровни энергии материалов, которые мы используем гораздо выше, чем естественный уровень энергии металлов в природной среде. Природа не рассматривает новый энергетический уровень как очень благоприятный и начинает процесс возвращения металлов к исходному состоянию. Металлы начинают корродировать, затем выделяется энергия и начинается коррозионный процесс (рисунок 3.6).



Присутствие воды/влаги и кислорода создают предпосылки для коррозии ста-

Рисунок.3.6 – Энергетические уровни материалов, связанные с процессом производства.

В очень упрощенной модели можно сказать, что энергия, необходимая для производства металла или сплава, является движущей силой для начала процесса коррозии. Немного позднее было замечено, что сплавы можно оценивать по стойкости к коррозии – какой из них более стойкий, а какой вероятнее всего подвергнется коррозии.

В большинстве случаев коррозия металлов является электрохимическим процессом, при котором происходит окисление металлов. Чем активнее металл, тем он быстрее окисляется.

При погружении металла в электролит возникает **электродный потенциал**, устанавливающийся на границе электрод-электролит.

Потенциал коррозии – это потенциал металла относительно электролита, установившийся в результате протекания сопряженных анодного и катодного процессов без внешней поляризации.

Потенциал гальванической ячейки вытекает из «пары» электродов. Однако, невозможно определить величину потенциала гальванической ячейки для каждого электрода в паре, используя эмпирически полученный потенциал гальванической ячейки. Поэтому установлен стандартный водородный электрод, для которого этот потенциал принят равным 0,00 В, и относительно которого сравнивают потенциалы металлов и сплавов.

Стандартный электродный потенциал ϕ_0 – потенциал, измеренный в стандартных условиях относительно стандартного (водородного) электрода сравнения.

Перечень материалов в порядке увеличения их потенциалов коррозии называют **гальваническим рядом** металлов и сплавов (Таблица 3.1).

Другими словами, **гальванический ряд** – это сравнительная активность металлов и сплавов при их контакте в порядке преобладающего влияния предыдущих элементов над последующими. Т.е. наиболее легко корродируемые, или наиболее активные материалы, находятся в верхней части гальванического ряда и, наоборот, наименее легко корродируемые, или менее активные материалы – в нижней части.

Активные металлы имеют отрицательные коррозионные потенциалы, их также часто называют анодными.

Менее активные металлы имеют положительные коррозионные потенциалы, часто называемые катодными или благородными.

Коррозия гальванических пар металлов протекает по следующим правилам:

– При наличии соединенных разнородных металлов, наиболее активный (анодный) металл корродирует быстрее, в то время как более благородный (менее активный или катодный) металл лучше защищен и корродирует не так быстро.

– Скорость коррозии возрастает по мере увеличения разности потенциалов между металлами.

– Изменения в условиях окружающей среды или температуры может повлиять на порядок гальванического ряда.

Некоторые материалы можно применять для совместного использования без образования гальванической пары. В таблице 3.2 приведена совместимость некоторых металлов и сплавов.

Таблица 3.1. – Гальванический ряд основных металлов

	Металл	$\phi_0, В$
1.	Магний	-2,37
2.	Алюминий	-1,70
3.	Цинк	-0,76
4.	Хром	-0,74
5.	Железо	-0,44
6.	Чугун	
7.	Водород	0,0
8.	Прокатная окалина	
9.	Латунь	
10.	Медь	+0,33
11.	Бронза	
12.	Нержавеющая сталь	
13.	Серебро	+0,80
14.	Платина	+1,2
15.	Золото	+1,50

Таблица 3.2 – Совместимость металлов и сплавов

Материал	Алюминий и сплавы	Медь и сплавы	Никель	Олово	ПОС	Сталь	Хром	Цинк
Алюминий и сплавы	С	Н	Н	Н	Н	С	Н	С
Медь и сплавы	Н	С	С	П	П	Н	С	Н
Никель	Н	С	С	П	П	С	–	С
Олово	Н	П	П	С	С	С	–	С
ПОС	Н	П	П	С	С	С	–	С
Сталь	С	Н	С	С	С	С	С	С
Хром	Н	С	–	–	–	С	С	С
Цинк	С	Н	С	С	С	С	С	С

С – совместимые
Н – несовместимые
П – совместимые при пайке, но несовместимые при непосредственном соприкосновении, так как образуют гальваническую пару
 ПОС – (припой оловянно-свинцовый)
 Сталь – (нелегированная)

По принципу избегания образования гальванических пар нельзя сочетать детали водной техники из нержавеющей стали и алюминия, так как происходит ускоренное коррозионное разрушение алюминиевых частей. В состав сплава этой легированной стали входят такие вещества как никель и хром, которые не совместимы с алюминием.

В гальванической паре сталь-алюминий сталь будет находиться под катодной защитой алюминия, но сам алюминий будет интенсивно разрушаться.

3.1.8. Окружающая среда и коррозия.

3.1.8.1. Факторы, влияющие на скорость коррозии.

Реакции коррозии могут быть ускорены определенными условиями, наиболее важными из которых являются:

1. Влажность (или Влага).

Увлажнение поверхностей обусловлено многими факторами, например, роса, дождь, таяние снега и высокий уровень влажности воздуха.

Влажность воздуха и продолжительность влажных суток в году существенно влияют на скорость распространения коррозии. Продолжительность влажных суток в году относится к продолжительности воздействия атмосферы на поверхность с достаточным количеством влаги, когда может произойти коррозия, при которой появляется сплошная пленка влаги на поверхности металла в результате конденсации воды из воздуха. Коррозия стали может происходить и без видимой воды, но ее скорость значительно снижается.

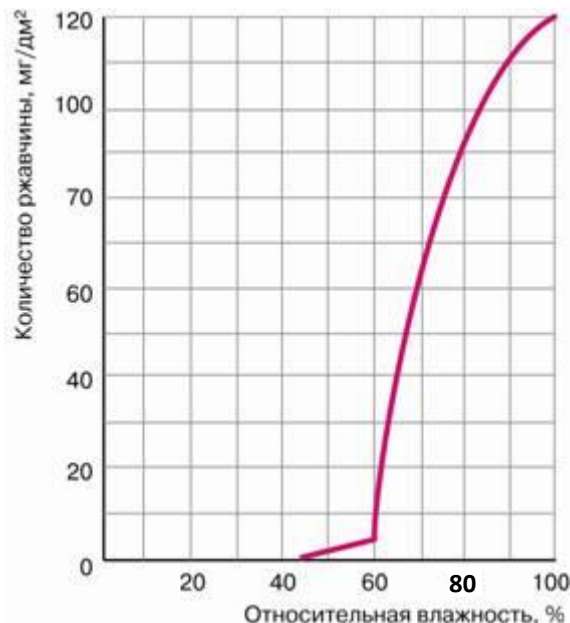


Рисунок 3.7. – Зависимость скорости атмосферной коррозии от относительной влажности воздуха.

На рисунке 3.7 показано качественное влияние относительной влажности воздуха на скорость атмосферной коррозии углеродистой стали. Зависимость увеличения массы продуктов коррозии от относительной влажности воздуха получена при экспозиции стальных образцов в атмосфере, содержащей 0,01% SO₂, в течение 55 суток.

Для оценки расчетного времени влажности, при которой происходит корродирование поверхности, стандартом ISO 9223 используется продолжительность времени, когда относительная влажность воздуха превышает 80% при температуре воздуха выше 0°C.

2. Содержание кислорода на поверхности материалов.

Более высокая концентрация кислорода увеличивает скорость коррозии. Коррозия может происходить и в обедненной кислородом среде, но скорость протекания коррозии, как правило, гораздо медленнее. Например, в условиях погружения в воду, где концентрация кислорода низкая, процесс коррозии протекает медленнее, чем в зоне переменного смачивания. Другой пример: система отопления со стальными трубами быстрее изнашивается, если из нее в неотопливаемый сезон выпускают теплоноситель, чем та у которой теплоноситель не выпускается.

3. Температура окружающей среды.

Коррозионная реакция имеет электрохимический характер, которая, как правило, ускоряется с повышением температуры. Таким образом, коррозия протекает быстрее, в более теплых условиях, и медленнее в – более холодных.

4. Загрязняющие вещества и кислые газы.

На скорость атмосферной коррозии очень сильно влияют **примеси, содержащиеся в воздухе** SO₂, H₂S, NH₃, HCl и др. **Кислые газы**, такие как диоксид углерода (CO₂), также могут растворяться в пленке влаги, контактирующей с металлом. **Кислотный дождь** (химический побочный продукт производственных и перерабатывающих заводов) также способствует ускорению коррозии.

Наряду с непосредственным химическим воздействием, эти вещества повышают проводимость электролита и гигроскопичность продуктов коррозии. Снижение сопротивления коррозионного элемента увеличивает силу коррозионного тока, и пропорционально происходят повышение скорости коррозии.

Агрессивность среды, как правило, определяется свойствами электролита. Рабочая среда объекта может быть:

- (1) погружение в жидкость (воду), или
- (2) атмосферная.

Зависимость изменения скорости коррозии от загрязнений окружающей среды (солями и кислыми газами), а также ее температуры условно показана на рисунке 3.8.

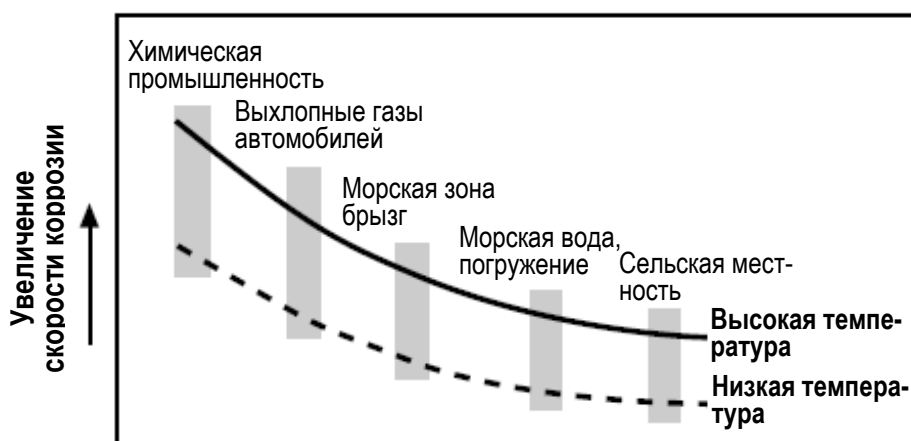


Рисунок.3.8 – Изменение скорости коррозии в зависимости от температуры и окружающей среды.

Химические соли увеличивают скорость коррозии за счет повышения эффективности (проводимости) электролита. Наиболее распространенной химической солью является хлорид

натрия, как один из основных элементов морской воды. Хлорид натрия, осажденный на открытых поверхностях при атмосферном воздействии также выступает в качестве гигроскопичного материала, поглощающего влагу из воздуха. Осажденные соли также повышают скорость коррозии в атмосферных условиях. Другие химические соли включают сульфаты, получаемые из сернистых продуктов промышленного сгорания.

Твердые частицы в виде нейтральных частиц могут облегчать конденсацию влаги на поверхности (частицы угля, пыль, частицы абразива и т.п.).

Стандарт ISO 9223:2012 «Коррозия металлов и сплавов. Коррозионная активность атмосферы. Классификация, определение и оценка» в качестве ключевых коррозионных факторов атмосферы для металлов и сплавов рассматривает время сырости, и уровни загрязнения диоксидом серы (SO₂) и хлоридами.

Наиболее важным фактором в той или иной категории времени увлажнения является уровень загрязнений, вызванных диоксидом серы или содержащимися в воздухе солями. Уровень загрязнений должен измеряться в соответствии с техническими требованиями ISO 9225.

Другие виды загрязнений (оксиды азота NO₂ и промышленная пыль в густонаселенных и промышленных зонах) или специфические операционные и технологические загрязнения микроклиматов (сероводород H₂S, органические кислоты и антиобледенители) также оказывают влияние на скорость коррозии. Однако эти виды загрязнений не используются стандартом ISO 9223 в критериях классификации атмосферы.

5. Наличие напряжений в металле.

Ускоряет коррозионные процессы и наличие напряжений в металле. Поскольку деформированные места имеют более низкий потенциал (катодные участки), то между деформированными и недеформированными участками конструкций возникает разность потенциалов, которая при наличии электролита обуславливает быструю коррозию. Кроме того, различные потенциалы имеют металл и продукты его коррозии, а также прокатная окалина.

6. Другие металлы или металлические соединения.

Другие металлы всегда присутствуют в стали в виде примесей и добавок. Металлические соединения, более благородные по отношению к железу, имеют более положительный потенциал при контакте со сталью (например, медь). Прокатная окалина также имеет более высокий потенциал, чем железо, и по отношению к нему является катодом. Их присутствие в/на стали активизирует гальванический коррозионный процесс, окисляя железо. К тому же полученные продукты коррозии сами приобретают потенциал, более высокий, чем у железа, переходя в состояние катодных участков, а свободные участки железа переводятся в состояние анодных участков. Таким образом, процесс гальванической коррозии ускоряется.

3.1.8.2. Типы окружающей среды по степени увлажнения поверхности.

Одним из основных факторов, определяющим механизм и скорость электрохимической коррозии, является степень увлажнения поверхности металла. По степени увлажнения различают четыре основных типа окружающих условий:

1) Сухая атмосферная коррозия.

Сухая атмосферная коррозия – коррозия при наличии на поверхности металла очень тонкой адсорбционной пленки воды (порядка нескольких молекулярных слоев общей толщиной δ от 1 до 10 нм), которую еще нельзя рассматривать как сплошную и как обладающую свойствами электролита.

2) Влажная атмосферная коррозия.

Влажная атмосферная коррозия – коррозия при наличии на поверхности металла тонкой невидимой пленки воды, которая образуется в результате адсорбционной, физической или

химической (обусловлена гигроскопичностью образующихся продуктов коррозии) конденсации при относительной влажности воздуха ниже 100% (толщина пленки δ от 10 до 1000 нм). Пленка воды становится сплошной и приобретает свойства электролита.

3) Мокрая атмосферная коррозия.

Мокрая атмосферная коррозия – коррозия при наличии на поверхности металла видимой пленки воды (толщина пленки от 1 мкм до 1 мм). Коррозия этого типа наблюдается при относительной влажности воздуха около 100%, когда имеет место капельная конденсация воды на поверхности металла, а также при непосредственном попадании воды на поверхность (дождь, гидроочистка поверхности и т.п.).

4) Коррозия при полном погружении

Коррозия при полном погружении – коррозия металла, полностью погруженного в жидкую коррозионную среду – воду (толщина пленки свыше 1 мм).

На рисунке 3.9 показана качественная зависимость скорости атмосферной коррозии от толщины слоя воды на поверхности металла.

Минимальные скорости коррозии имеют место при сухой атмосферной коррозии, протекающей по механизму химической коррозии (участок 1).

С увеличением толщины пленки воды с 10 нм до 1 мкм происходит переход механизма коррозии от химического к электрохимическому, что соответствует быстрому росту скорости коррозионного процесса (участок 2).

Из приведенной зависимости видно, что максимум скорости коррозии соответствует граница участков 2 и 3 (толщина пленки воды около 1 мкм), а затем наблюдается некоторое замедление коррозии вследствие осложнения диффузии кислорода через утолщенный слой воды.

Еще более толстые слои воды на поверхности металла (участок 4) приводят лишь к незначительному замедлению коррозии, так как в меньшей степени будут влиять на диффузию кислорода.

На практике не всегда можно так четко разграничить первые три типа атмосферной коррозии, так как в зависимости от внешних условий возможен переход от одного типа к другому. Так, например, металлоконструкция, которая корродировала по механизму сухой коррозии, при увеличении влажности воздуха начнет корродировать по механизму влажной коррозии, а при выпадении осадков уже будет иметь место мокрая коррозия. При высыхании влаги процесс будет меняться в обратном направлении.

3.1.8.3. Атмосферно-коррозионные категории среды.

Коррозионная категория атмосферы является технической характеристикой, которая служит основой для выбора материалов и защитных мер в атмосферных условиях с учетом соблюдения специфических требований их применения, особенно принимая во внимание срок службы защитных систем.

По степени коррозионной агрессивности атмосферы стандарт EN 12500 определяет пять типов открытых сред на основе наличия коррозионно-активных веществ в воздухе:

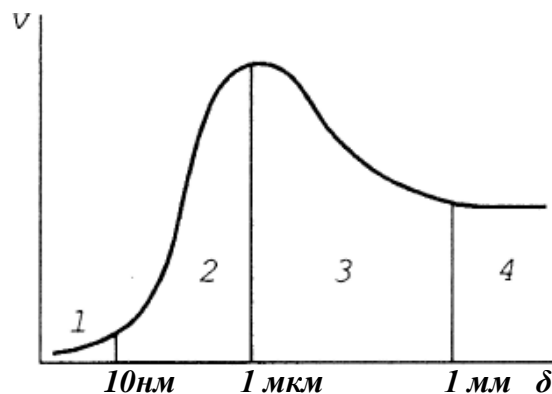


Рисунок 3.9. – Зависимость скорости коррозии от толщины слоя влаги на поверхности металла: 1 - сухая атмосферная коррозия; 2 - влажная атмосферная коррозия; 3 - мокрая атмосферная коррозия; 4 - коррозия при полном погружении.

Сельская атмосфера: сельская местность и небольшие города, незначительное загрязнение коррозионно-активными веществами (диоксиды углерода, хлориды, искусственные удобрения).

Городская атмосфера: в густонаселенных районах, незначительная промышленная деятельность, среднее загрязнение коррозионно-активными веществами (диоксиды серы);

Промышленная атмосфера: интенсивная промышленная деятельность, высокое загрязнение коррозионно-активными веществами (диоксиды серы);

Морская атмосфера: области близко расположенные возле моря, или внутренние зоны сильно зависящие от солености в воздухе. Коррозионное воздействие под влиянием топографических условий, т.е. преобладающего направления ветра.

Морская промышленная атмосфера: сложная среда, районы, близкие как к морю, так и к промышленным районам или внутренние зоны, расположенные по преобладающему направлению ветра. Среднее и/или сильное загрязнение коррозионно-активными веществами (диоксиды серы, хлориды). Это очень агрессивная среда, которая вызывает очень быстрое ржавление. Воздушно-капельные соли, и химические загрязняющие вещества могут служить стимулом к коррозии. Влажность воздуха и морской воды обеспечивают электролиты, которые также ускоряют процесс.

Таблица 3.3 – Скорость коррозии в течение первого года воздействия для различных коррозионных категорий атмосферной среды (ISO 9223).

Потери массы, г/(м ² ·год) потеря толщины, мкм/год							Атмосферно-коррозионные категории		
Углеродистая сталь		Цинк		Медь		Алюминий			
≤10	≤1,3	≤0,7	≤0,1	≤0,9	≤0,1	Незначительные		Очень низкая	C1
10-200	1,3-25	0,7-5	0,1-0,7	0,9-5	0,1-0,6	≤0,6	–	Низкая	C2
200-400	25-50	5-15	0,7-2,1	5-12	0,6-1,3	0,6-2	–	Средняя	C3
400-650	50-80	15-30	2,1-4,2	12-25	1,3-2,8	2-5	–	Высокая	C4
650-1500	80-200	30-60	4,2-8,4	25-50	2,8-5,6	5-10	–	Очень высокая	C5

Количественная оценка коррозионной агрессивности атмосферы определяется согласно EN 12500 и ISO 9223 на основе значений потери массы стандартных плоских образцов (прямоугольной формы, 50 × 100 мм) из четырех материалов (углеродная сталь, медь, цинк, алюминий) после одного года воздействия. Классификация атмосферно-коррозионных категорий определяется в соответствии с таблицей 3.3.

На практике трудно выявить влияние отдельных факторов на скорость коррозии металла в конкретных условиях эксплуатации, но можно примерно оценить ее, исходя из обобщенных характеристик атмосферы.

Несмотря на то, что атмосферно-коррозионные категории рекомендуется определять по потерям веса или толщины образцов, качественную классификацию агрессивности атмосферы можно оценить по описаниям типичных атмосферных условий, когда данные таких полевых испытаний не доступны, (таблица 3.4).

В качестве альтернативы такой качественной классификации, можно воспользоваться коррозионной таблицей ISO 9223:2012, где приводится соответствие между атмосферно-коррозионными категориями среды и совокупным воздействием наиболее значимых факторов: времени увлажнения (ч./год), скорости осаждения серосодержащих веществ в пересчете на SO₂ (мг/м²) и скорости осаждения содержащимися в воздухе солями в пересчете на хлориды (мг/м²).

Таблица 3.4 – Качественная классификация категории коррозионности атмосферы.

Категории коррозионности		Типичные наружные атмосферные среды по EN 12500	Примеры типичной среды по ISO 12944-2	
			Вне помещений	Внутри помещений
C1	Очень низкая	Сухие или холодные зоны; очень низкое содержание загрязняющих веществ; очень низкое время влажности, например, пустыни, антарктическая зона.		Отапливаемые помещения с чистой атмосферой, например офисы, магазины, школы, гостиницы.
C2	Низкая	Умеренный пояс; низкий уровень загрязнений ($SO_2 < 12$ мкг/м ³), например, в сельской местности и небольших городах. Сухие или холодные зоны; короткие влажные периоды, например, пустыни, субарктические зоны.	Атмосфера с низким уровнем загрязнения. В основном сельские районы.	Не отапливаемые помещения, где может быть конденсация, например депо, спортивные залы.
C3	Средняя	Умеренные зоны; средний уровень загрязнений ($12 < SO_2 < 40$ мкг/м ³). Низкое влияние хлоридов, например, городские районы, прибрежные зоны характеризуются низкой скоростью осаждения хлоридов. Тропические зоны с низким уровнем загрязнения окружающей среды.	Городские или промышленные атмосферы, умеренно загрязненные сернистым ангидридом. Прибрежные территории с низким уровнем солености.	Производственные комнаты с высокой влажностью и некоторым загрязнением воздуха, например заводы по переработке продуктов питания, прачечные, пивоваренные и молочные заводы.
C4	Высокая	Умеренные зоны; высокий уровень загрязнений ($40 < SO_2 < 90$ мкг/м ³); существенное воздействие хлоридов, например, загрязненные городские районы, промышленные зоны, прибрежные районы (без зон переменного смачивания), влияние антиобледеняющих солей. Тропические зоны со средним уровнем загрязнений.	Промышленные и прибрежные территории с умеренной соленостью	Химические заводы, плавательные бассейны, прибрежные верфи и судоремонтные заводы.
C5	Очень высокая	Умеренные зоны; очень высокий уровень загрязнения ($90 < SO_2 < 250$ мкг/м ³); высокие темпы осаждения хлоридов, например, промышленные зоны, прибрежные и морские районы (без зон переменного смачивания). Тропические зоны с высоким уровнем загрязнений и/или сильным воздействием хлоридов.	Промышленные зоны с высокой влажностью и агрессивной атмосферой. Прибрежные или морские территории с высокой соленостью.	Здания или площади с почти постоянной конденсацией и с очень высоким загрязнением. Здания или площади с почти постоянной конденсацией и с очень высоким загрязнением.

Время увлажнения определяется как количество часов в году, в течение которых относительная влажность превышает 80%, и средняя температура превышает 0°C. Пять классов времени увлажнения обозначаемые τ_1 - τ_5 , начиная от внутренней среды с климат-контролем ($\tau_1 \leq 10$ часов/год) и заканчивая временем увлажнения для наиболее агрессивного влажного климата ($\tau_5 \geq 5500$ часов/год).

Категория загрязнения соединениями серы в пересчете на диоксид серы SO_2 характеризуется четырьмя уровнями (P₀-P₃), значения которых приведены по мере возрастания в табл. 3.4. для типичных сред наружной атмосферы по EN 12500.

Наконец, четыре уровня скорости осаждения солей, находящихся в воздухе, в пересчете на хлориды (S_0 - S_4) от $S_0 \leq 3$ мг/(м²·день) до $300 < S_4 \leq 1500$ мг/(м²·день).

Пример применения табличных данных по значениям основных факторов, влияющих на скорость коррозии, по ISO 9223 представлен в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Применение табличных данных по ISO 9223 для углеродистой стали для времени увлажнения $250 < \tau_3 \leq 2500$ часов/год, или $3 < \tau_3 \leq 30\%$

Время увлажнения $250 < \tau_3 \leq 2500$ часов/год, или $3 < \tau_3 \leq 30\%$		Категории коррозионности			
Диоксид серы: концен- трация (мкг/м ³) или ско- рость осаждения (мг/м ² ·день)	P3	C2	C2	C3	C4
	P2	C1-2	C1-2	C2-3	C3-4
	P1	C1	C1	C2	C3-4
	P0	C1	C1	C2	C3-4
		S0	S1	S2	S3
Скорость осаждения хлоридов (мг/м ² ·день)					

3.1.8.4. Методология классификации атмосферно-коррозионной категории среды (ISO 9223).

Характер и скорость коррозии являются следствием действия коррозионной системы, которая включает в себя металлические материалы, атмосферную среду, технические показатели и условия эксплуатации.

Способы определения и оценивания атмосферно-коррозионной категории для конкретной местности в соответствии со стандартом ISO 9223 представлены на рисунке 3.10.

Необходимо различать понятия **определение** коррозионной активности и **оценивание** коррозионной активности. Кроме того, необходимо провести различие между оцениванием коррозионной активности, основанным на **применении функции доза-реакция** и тем, что основано на сравнении с **описанием типичных атмосферных условий**.

Соответственно категория коррозионной активности:

- определяется как коррозионные потери, вызванные воздействием коррозионной среды на стандартные образцы в течение первого года, как указано в ISO 9226;
- оценивается в показателях наиболее значимых атмосферных факторов, влияющих на коррозию металлов и сплавов. Порядок измерения соответствующих параметров окружающей среды предусмотрен стандартом ISO 9225.

Стандарт ISO 9223 не принимает во внимание конструкцию и режим работы объекта, которые могут повлиять на его стойкость к коррозии, так как их влияние весьма специфично и не может быть обобщено.

Шаги в выборе оптимизированных мер защиты от коррозии в атмосферных условиях, определены в ISO 11303.

3.1.8.5. Коррозия в воде и почве.

Тесты для оценки влияния коррозионности воды и почвы в данном случае не рекомендуются. Однако различные условия погружения или заглубления могут быть описаны.

Особое внимание должно быть уделено конструкциям, которые частично погружены в воду или частично заглублены в грунт. Коррозия при таких условиях часто ограничивается незначительной частью конструкции, но уровень коррозии здесь очень высок.

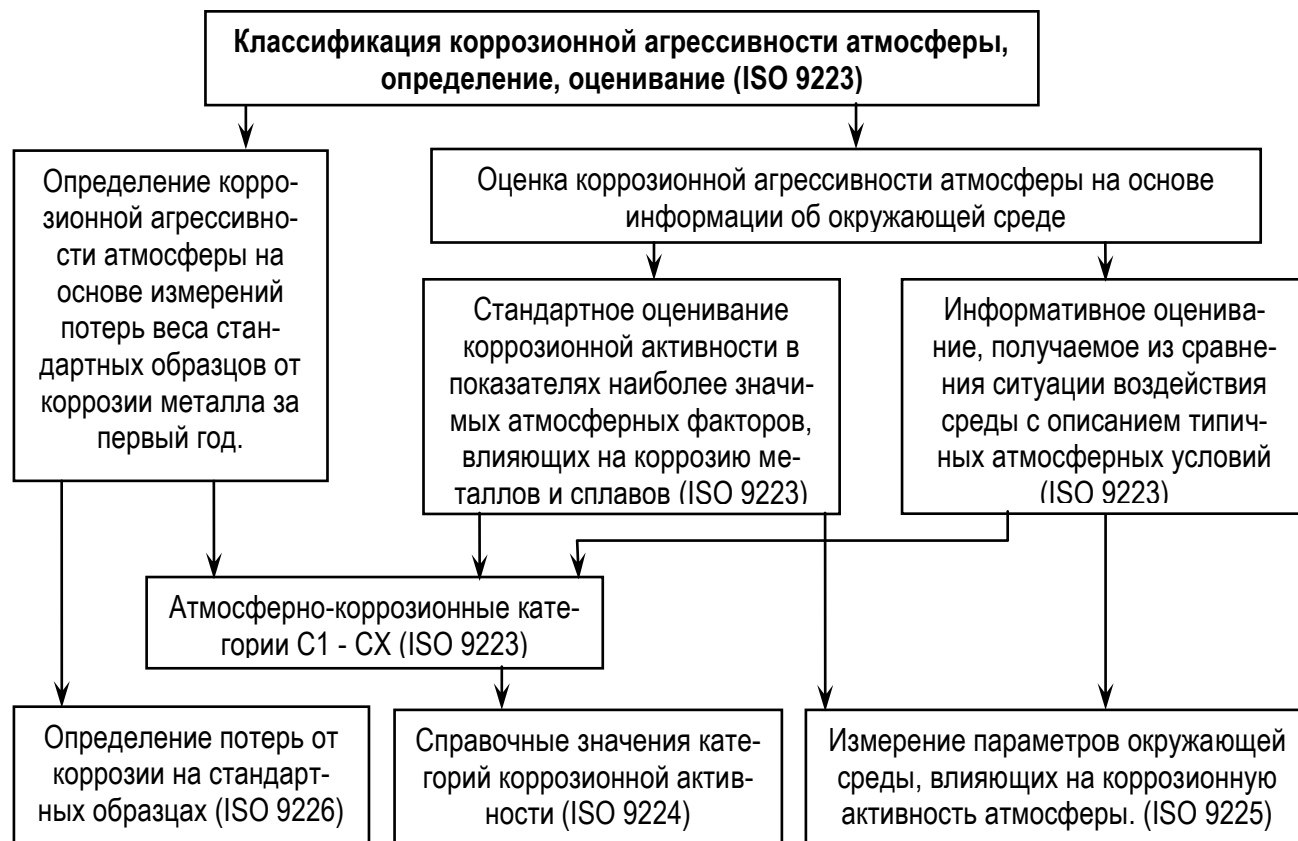


Рисунок. 3.10. – Методы классификации коррозионной агрессивности атмосферы

Стандарт ISO 9223 не принимает во внимание конструкцию и режим работы объекта, которые могут повлиять на его стойкость к коррозии, так как их влияние весьма специфично и не может быть обобщено.

Шаги в выборе оптимизированных мер защиты от коррозии в атмосферных условиях, определены в ISO 11303.

Конструкции, погруженные в воду

Тип воды – пресная, солоноватая или соленая – имеет значительное влияние на коррозию стали. На коррозионность воды также влияет содержание кислорода в воде, тип и количество растворенных в воде веществ и температура воды. Наличие микроорганизмов или водорослей может ускорить коррозию.

Три разные **зоны погружения в воду** могут быть определены как:

- **Подводная зона** - область, которая постоянно находится под водой;
- **Промежуточная или переменная зона** – область, в которой уровень воды меняется из-за природных (прилив-отлив) или искусственных (балластные танки) эффектов, таким образом, увеличивая коррозию из-за комбинированного воздействия воды и атмосферы;
- **Зона брызг** – область, подверженная действию волн или брызг, которые могут привести к исключительно высокой коррозии, особенно если это морская вода.

Конструкции, заглубленные в грунт.

Коррозия в почве зависит от содержания минералов в почве и от их природы, а также от наличия органических веществ, воды и содержания кислорода.

Большинство почв имеет нейтральную или близкую к ней реакцию ($\text{pH} = 5-8$), но существуют почвы, имеющие кислую ($\text{pH} = 3-5$) или щелочную ($\text{pH} = 8-10$) реакцию. С понижением pH (гумусовые и болотистые почвы) коррозионная активность будет заметно возрастать.

На коррозионность почвы влияет степень проветривания. Содержание кислорода может меняться, и при этом могут формироваться коррозионные элементы. Там, где главные стальные конструкции такие, как трубопроводы, тоннели, цистерны и т.д., находятся под различными типами почв, грунтов с различным содержанием кислорода, почв с различным уровнем грунтовых вод и т.д., увеличение местной коррозии может происходить через формирование коррозионных элементов.

Категории коррозивности для воды и почвы.

Для конструкций, погруженных в воду и заглубленных в почву, коррозия обычно имеет местный характер и класс коррозивности очень трудно определить. Однако для этой цели в Международных Стандартах описываются различные окружающие среды. В таблице 3.6. приведены три различных окружающих среды, вместе с их обозначением.

Таблица 3.6 – Коррозионные категории для воды и грунта.

Категория	Окружение	Образцы окружающей среды и конструкций
Im1	Пресная вода	Речные сооружения, гидроэлектростанции
Im2	Морская или солоноватая вода	Гавани с их конструкциями, такими как, шлюзы, плотины, пристани
Im3	Грунт	Заглубленные цистерны, стальные сваи, стальные трубопроводы

3.2. Виды коррозии.

Основные виды коррозии приведены в международном стандарте ISO-8044 «Коррозия металлов и сплавов – общие термины и положения»

По характеру разрушения коррозию металлов глобально различают два основных вида: общую (сплошную) коррозию, охватывающую всю поверхность металла, и локальную (местную) коррозию, охватывающую отдельные участки поверхности металла.

3.2.1. Формы коррозии на различных материалах.

Все материалы имеют свои как сильные, так и слабые стороны. В то время как некоторые очень устойчивы к коррозии в одной окружающей среде, они могут иметь плохие показатели в другой. Различные материалы будут восприимчивы к различным типам коррозии. Поэтому, выбирая материал важно знать о свойствах различных материалов. Наиболее часто встречающиеся формы коррозии для наиболее часто используемых материалов приведены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Общие формы коррозии некоторых материалов.

Углеродистая сталь	
– Однородная коррозия	В большинстве агрессивных средах, где электролит неподвижный.
– Неравномерная коррозия (язвенная коррозия)	В большинстве агрессивных средах при высоких скоростях потока.
– Гальваническая коррозия	В коррозионных средах в сочетании с более благородным материалом.
– Коррозионное растрескивание под напряжением	Для высокопрочных сталей на растяжение. Сочетание механических воздействий и агрессивных сред.

Продолжение Таблицы 3.7.

Нержавеющая сталь	
– Щелевая коррозия	В частности, в водных средах, содержащих агрессивные ионы, как хлориды. Типичный пример: Морская вода
– Точечная коррозия	В частности, в водных средах, содержащих агрессивные ионы, как хлориды. Типичный пример: Морская вода
– Коррозионное растрескивание под напряжением	Сочетание механических воздействий и агрессивных сред.
Алюминий	
– Точечная коррозия	В частности, в водных средах, содержащих агрессивные ионы, как хлориды. Типичный пример: Морская вода
– Гальваническая коррозия	В коррозионных средах в сочетании с более благородным материалом
–	
–	
Медные сплавы	
– Коррозионная эрозия	При скоростях потока, превышающих 2-2,5 м/с. Усугубляется в присутствии загрязнений, особенно сульфидов.
-	
Титан	
– Водородное охрупчивание	Некоторые типы под воздействием высоких растягивающих усилий близких к источнику водорода.
– Усталость	Хорошая стойкость. Испытан в теплообменниках.

3.2.2. Сплошная коррозия.

Сплошная коррозия охватывает всю поверхность металла, которая находится под воздействием коррозионной среды.

Сплошная коррозия может быть равномерной, если процесс протекает с одинаковой скоростью по всей поверхности металла, и неравномерной когда скорость процесса неодинакова на различных участках поверхности.

Формы сплошного коррозионного поражения по ГОСТ 9.908-85 отличаются только неровностью поверхности (рисунок. 3.11, а и б). Форма (рисунок. 3.11, в) может быть переходной между сплошной и избирательной коррозией. Тип коррозии может быть уточнен по изменениям ее формы в зависимости от времени воздействия коррозионной среды, а также по структуре металла.

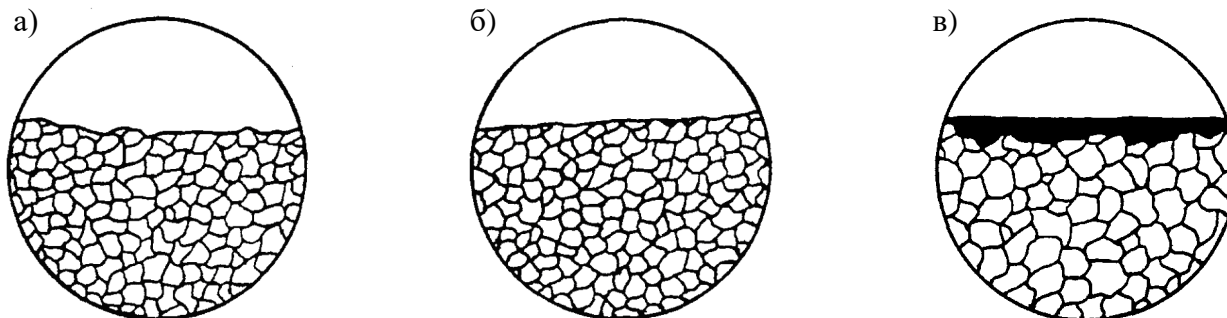


Рисунок. 3.11. – Формы сплошного (равномерного) коррозионного поражения:
а, – неровная поверхность; б – ровная поверхность; в – переходная форма между
сплошной и избирательной коррозией

Наличие общей коррозии выявляют по изменению формы поверхности после коррозионного воздействия. Она определяется изменением массы и размеров образцов до и после коррозионного испытания.

Общая коррозия относительно легко выявляется и не вызывает катастрофических разрушений конструкций.

Влияние сплошной коррозии приводит к пропорциональному уменьшению толщины материалов со временем. Потеря толщины металла при общей коррозии может быть рассчитана по данным о скорости такой коррозии. Например, скорость общей коррозии 0,13 мм/год может привести к потере металла 1,52 мм за двенадцатилетний период. Коррозионный допуск в 1,6 мм часто бывает достаточным, чтобы обеспечить 12 лет службы конструкций под атмосферным воздействием, и 25 лет – в резервуарах.

Тем не менее, мир редко бывает идеальным и постоянным и в большинстве случаев следует ожидать неравномерную коррозию. Таким образом, локальное агрессивное воздействие коррозии может протекать до 10 раз быстрее, чем расчетное теоретическое среднее значение.

3.2.3. Местная коррозия.

Местная коррозия по форме соответствует сплошной коррозии, но отличается тем, что коррозии подвержена часть поверхности или коррозия протекает с разной скоростью на его отдельных участках.

Локальная коррозия, сконцентрированная преимущественно на отдельных участках поверхности металла, подверженной воздействию коррозионной среды. Участки, примыкающие непосредственно к локальным коррозионным повреждениям, обычно корродируют в значительно меньшей степени или совсем не корродируют. Локальная коррозия часто происходит на труднодоступных участках, осмотр которых затруднен.

Локальная коррозия менее распространена в атмосферных условиях, чем при погружении, в зоне переменного смачивания и зоне брызг, а также при длительном воздействии загрязняющих веществ или коррозионных элементов. Коррозионные элементы образуются, когда различные типы металлов находятся в электрическом контакте в одном электролите. Различают: макроэлементы с расстоянием между анодом и катодом от миллиметров до нескольких километров и микроэлементы с микроскопическими размерами.

Коррозионная активность на локализованных участках коррозия может изменяться в зависимости от присутствия:

- Дефектов покрытий;
- Изменений загрязнений поверхности и загрязняющих веществ;
- Изменений в электролите.

Различают следующие формы местной коррозии:

3.2.3.1. Питтинговая коррозия.

Питтинговая коррозия – локальная коррозия, ведущая к образованию язв, т.е. полостей, идущих от поверхности вглубь металла.

Питтинговая коррозия особенно распространена в металлах, которые образуют защитный оксидный слой, например нержавеющая сталь или алюминий, и в средах с высоким содержанием хлоридов (где хлориды способствуют разбивку оксидного слоя).

Образование полостей может быть начато либо на открытой поверхности, подверженной обильному воздействию среды, либо на дефектах защитного покрытия. Слабые места защитного окислительного слоя пронизывают агрессивные ионы (подобно хлоридов в морской во-

де). Затем менее благородный базовый материал раскрывается, и коррозия инициируется в определенном месте на этих оголенных участках.

Дно полости является небольшим анодом коррозионного элемента, сосредоточенным в одном месте, который часто усиливается относительно большим по площади катодом.

Глубокие, даже полностью проникающие полости, могут развиваться только с относительно небольшим количеством потерь металла.

Полости, образованные в результате питтинговой коррозии, могут быть как малого, так и большого диаметра, но чаще всего они относительно малы. Часто полости изолированы либо расположены так близко друг к другу, что выглядят как шероховатость поверхности. Сгруппированные несколько язв, могут формировать большую площадь повреждения.

В зависимости от соотношения ширины и глубины полостей коррозионных поражений ГОСТ 9.908 различает следующие формы коррозии: коррозия пятнами, коррозионная язва и питтинговая (точечная) коррозия.

Коррозия пятнами – мелкое коррозионное поражение неправильной формы, размер ширины которого превышает глубину (рисунок. 3.12, а).

Коррозионная язва – коррозионное поражение глубиной приблизительно равной ширине (рисунок. 3.12, б).

Питтинговая (точечная) коррозия – коррозионное поражение глубиной значительно больше ширины (рисунок. 3.12, в).

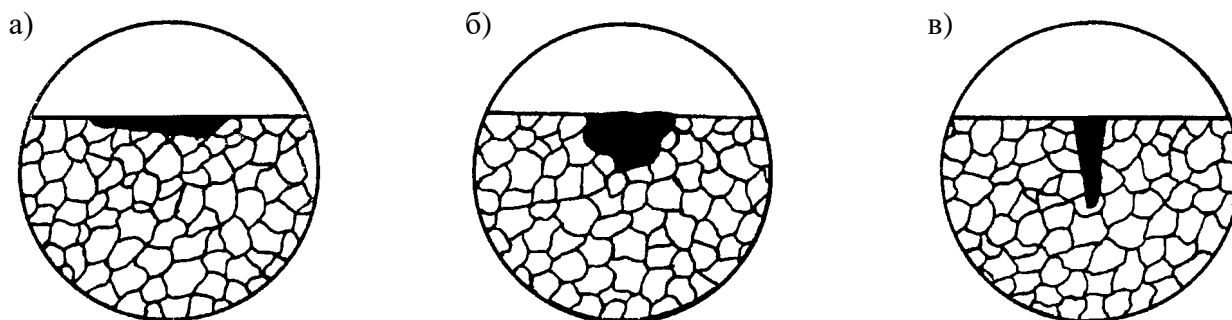


Рисунок. 3.12. – Схема видов локального коррозионного поражения с образованием язв: а – коррозия пятнами; б – коррозионная язва; в – питтинговая коррозия

Питтинговая (язвенная) коррозия – это одна из наиболее коварных форм коррозии. Она приводит к разрушению конструкций вследствие сквозного прободения при очень незначительной потере общего веса всей конструкции.

3.2.3.2. Межкристаллитная коррозия.

Межкристаллитная коррозия – коррозионное поражение характерно наличием прокорродировавшей зоны вдоль границ зерен металла, причем может затрагивать границы всех зерен или только отдельных зерен (рисунок. 3.13.).

3.2.3.3. Щелевая коррозия.

Щелевая коррозия – локальная коррозия, протекающая внутри или непосредственно вокруг узкого отверстия или зазора между металлической и любой другой металлической или неметаллической поверхностью (рисунок. 3.14.).

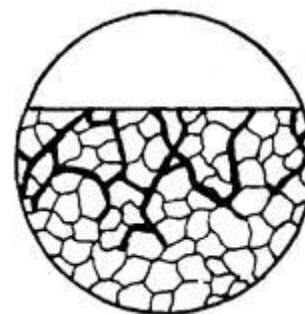


Рисунок. 3.13. – Межкристаллитная коррозия.

Для развития щелевой коррозии зазор должен быть достаточно широким для допуска раствора внутрь и, в то же время, достаточно узким, чтобы поддерживать застойность раствора в зоне щели, ограничивая процессы миграции и диффузии ионов. Растворы, содержащие хлорид-ионы, наиболее проводимые для развития щелевой коррозии.

Щелевая коррозия при атмосферной коррозии металлов обусловлена капиллярной конденсацией влаги в щелях и более долгим удерживанием в них влаги, чем на открытой поверхности.

Особенностью протекания щелевой коррозии является наличие малого количества окислителя либо его полное отсутствие, так как в узких зазорах подход окисляющего элемента к стенкам затруднен. Со временем в щели скапливаются продукты коррозии, которые могут изменять значение pH электролита внутри зазора, оказывают влияние на протекание анодного и катодного процесса. Повышение pH электролита способствует разрушению защитных пленок, которые образуются внутри щели. Щели и зазоры на основной поверхности металла являются макропарами, так как металл снаружи щели является катодом, а внутри — анодом.

Кроме того, локальная коррозия, связанная с и протекающая под осадком продуктов коррозии или другого вещества (также известная как **подосадковая коррозия**), имеет такой же механизм коррозии, что и щелевая коррозия.

3.2.3.4. Эрозионная коррозия.

Эрозионная коррозия – процесс, совмещающий коррозию и эрозию.

Эрозионная коррозия возможна, например, в трубах и насосах, при высокой скорости течения жидкости или содержания в ней взвешенных абразивных частиц.

Эрозионная коррозия является формой повреждений, вызванных слишком высокой скоростью потока движущейся жидкости. При этом создается завихрение жидкости, которое вымывает защитные слои или продукты коррозии из металлической поверхности. Тогда оголенный основной металл будет непрерывно подвергаться воздействию коррозионной среды (электролита), приводящему к очень высокой скорости локальной коррозии. Мягкие металлы наиболее подвержены такому типу коррозии, к примеру, медь, латунь, чистый алюминий и свинец, хотя большинство металлов также подвержены эрозионной коррозии, но значительно в меньшей степени.

Некоторые факторы, чаще всего инициирующие эрозионную коррозию:

- Внезапные изменения внутренних диаметров или направлений трубопроводов (рисунок 3.15), приводящие к образованию завихрений;
- Плохо пригнанные прокладки или соединения, образующие различные неровности на гладкой поверхности металла и вследствие чего возникновение течей в соединениях;
- Щели, позволяющие части жидкости отклоняться от основного потока;
- Наличие продуктов коррозии и других отложений, которые могут изменить ламинарность потока жидкости.



Рисунок. 3.14. – Щелевая коррозия

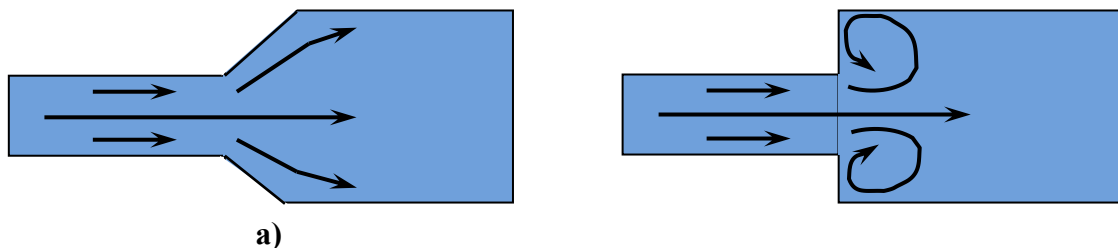


Рисунок 3.15. – Влияние конструктивных решений на степень коррозионной эрозии: конструкция (а) лучше, чем (б).

Проявление результатов эрозионной коррозии можно наблюдать в виде пазов, промоин, волновых и круглых ям и отверстий. Зачастую они могут иметь весьма специфический вид, называемый “копытным” разрушением рис. 3.16.

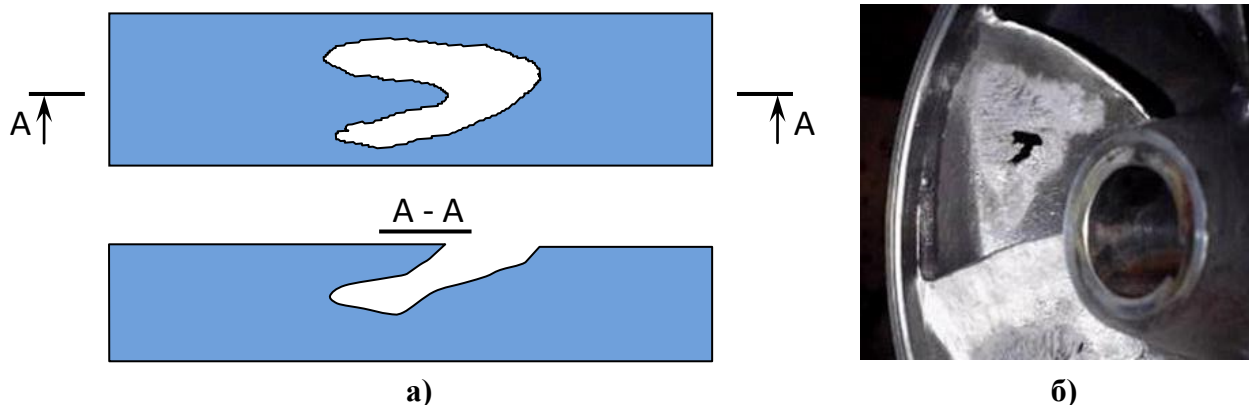


Рисунок. 3.16. – Эрозионная коррозия: а – схематичный вид; б – эрозионное повреждение рабочего колеса насоса.

3.2.3.5. Кавитационная коррозия.

Кавитационная коррозия – процесс, совмещающий коррозию и кавитацию.

Кавитация (пустота) – процесс парообразования и последующего схлопывания пузырьков пара с одновременной конденсацией пара в потоке жидкости. Кавитация сопровождается гидравлическими ударами, образованием в жидкости полостей (кавитационных пузырьков, или каверн), заполненных паром самой жидкости. Кавитация возникает в результате местного понижения давления в жидкости, которое может происходить при увеличении её скорости (гидродинамическая кавитация). Перемещаясь с потоком в область с более высоким давлением, кавитационный пузырёк схлопывается, излучая при этом ударную волну.

Кавитационная коррозия – коррозия металлов и сплавов в быстродвижущейся жидкой коррозионной среде. Механизм кавитационной коррозии можно рассматривать как поверхностную микрокоррозионную усталость, когда отдельные элементы структуры металла – кристаллиты, блоки, включения под влиянием пульсирующих ударов электролита и коррозионного воздействия среды растрескиваются и выкрашиваются. Это вызывает большие скорости роста коррозионных каверн (порядка мм/сутки). Кавитационная коррозия наблюдается на гребнях винтов морских судов, в быстроходных центробежных насосах, гидротурбинах и т.д. Наиболее устойчивы к кавитационному коррозионному разрушению нержавеющие стали, титан. Катодная защита может значительно снизить кавитационную коррозию углеродных сталей. Для защиты от кавитационной коррозии применяют иногда резиновые покрытия.

3.2.3.6. Гальваническая коррозия.

Гальваническая коррозия может возникать, когда различные металлические материалы, находящиеся под воздействием коррозионной среды (электролита), вступают в электрический контакт между собой или в контакт с токопроводящими неметаллами (например, углерод или прокатная окалина).

Когда два материала электрически соединены в морской воде, более отрицательный (активный) материал будет служить анодом, и будет иметь увеличенную скорость коррозии по сравнению с состоянием, когда он не находится в контакте с другим материалом. Более положительно заряженный (благородный) материал, катод, будет проявлять пониженную скорость коррозии.

Степень увеличения скорости коррозии за счет гальванической связи будет меняться в зависимости от конкретной ситуации. Как правило, на процесс гальванической коррозии будут влиять следующие факторы:

- Разница между коррозионными потенциалами соединенных металлов или сплавов.
- Площадь поверхности катодных и анодных зон. Когда площадь поверхности благородного металла (катод) велика по сравнению с активным компонентом (анод), существует неблагоприятное соотношение. Это будет приводить к ускоренной коррозии анода. Обратное соотношение площадей (большой анод и меньше поверхность благородного металла) вызывает лишь слегка ускоренный гальванический эффект.
- Расстояние между катодом и анодом. Чем меньше расстояние, тем сильнее влияние коррозии. Это показано на рисунке 3.17. Коррозия анода уменьшается с увеличением расстояния от катода, благодаря увеличенному электрическому сопротивлению.
- Электрическое сопротивление гальванической цепи. Коррозионный элемент можно сравнить с электрической цепью. Повышенное сопротивление приведет к снижению электрического тока и тем самым уменьшит скорость коррозии. Важными факторами являются проводимость металлов в гальванической паре и электролите. Таким образом, преимущество нанесения покрытия для уменьшения скорости коррозии очевидно, поскольку оно увеличивает электрическое сопротивление в цепи.

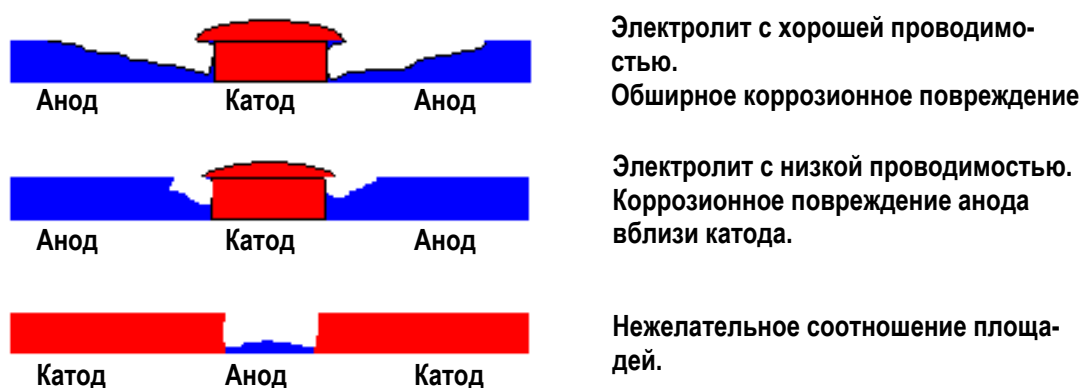


Рисунок 3.17. – Зависимость гальванической коррозии от проводимости электролита и соотношения площадей анода и катода.

Гальваническая коррозия металлов может измеряться путем тестирования металлов, погруженных в окружающую среду. Однако, в большинстве случаев гальваническая коррозия прогнозируется с использованием гальванического ряда.

В гальваническом ряду металлы и сплавы классифицируются согласно их свободных коррозионных потенциалов, измеренных как уровень напряжения в электролите, например мор-

ской воде. Разность потенциалов между материалами имеет решающее значение для скорости коррозии.

Если разность потенциалов превышает 50 – 100 мВ, менее благородный материал, может пострадать от ускоренной коррозии. Следует отметить, что потенциал и диапазон потенциалов может значительно отличаться под влиянием воздействующих условий, таких как, время, температура, и соленость морской воды в сравнении с высокими значениями скоростей коррозии.

3.2.3.7. Коррозионно-механическое растрескивание.

Коррозионно-механическое растрескивание – смежное действие напряжений и коррозионной среды, приводящее к образованию трещин, которые не развивались бы под действием только напряжений или воздействия только коррозионной среды по отдельности.

Трещины, образованные при таком комбинированном воздействии, часто трудно определить и при дальнейшем их росте может произойти внезапное катастрофическое разрушение.

Она обычно происходит в сосудах под давлением, трубопроводах, высоконапряженных элементах конструкций и в системах, когда происходит резкое отклонение от условий нормальной эксплуатации или окружающей среды (рисунок 3.18).

Напряжения, которые вызывают коррозионно-механическое растрескивание, являются либо результатом восприятия нагрузок во время эксплуатации элементов конструкций, либо остаточных напряжений, приобретенных в процессе производства (ковка, штамповка, сварка, механическая обработка и т.п.).

Окружающая коррозионная среда является либо постоянно действующей в условиях эксплуатации, например, морская вода, либо имеет временный характер в результате операций, таких, как очистка системы, после которой могут остаться осадки, либо когда нагрузки, прикладываемые в процессе работы, инициируют образование трещин.

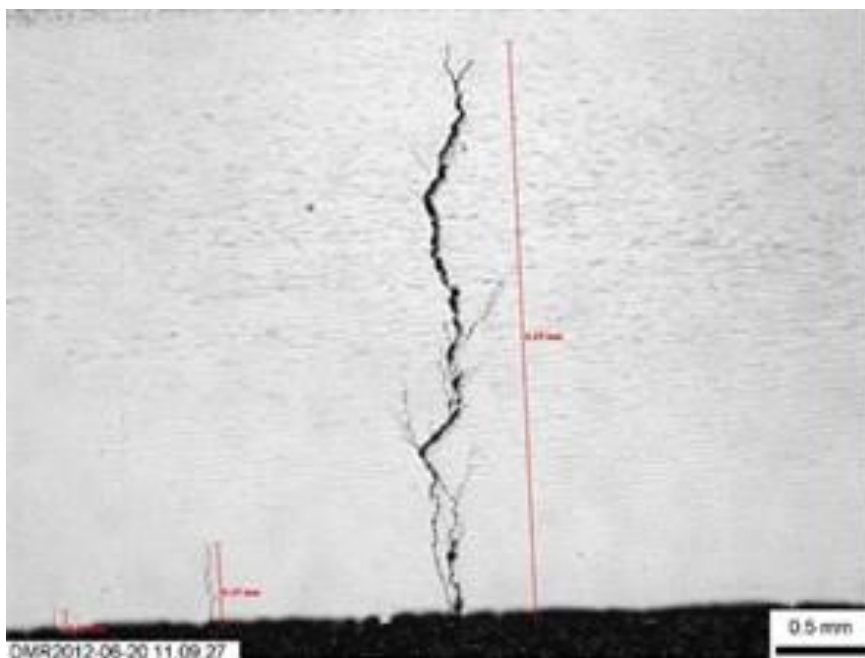


Рисунок 3.18 – Коррозионное растрескивание под напряжением с образованием трещины шириной от < 0,25 мм до >3 мм сквозь всю толщину стенки резервуара из аустенитной нержавеющей стали (по данным TWI).

Коррозионно-механическое растрескивание представляет собой механизм коррозии, который требует обязательного совпадения конкретного материала и соответствующей ему конкретной коррозионной среды, и действия растягивающего напряжения выше критического значения. В других средах коррозия может происходить без коррозионно-механического растрескивания. Хорошо известными такими парами материала и окружающей среды являются:

<u>МАТЕРИАЛ</u>	<u>ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА</u>
Латунь	Аммоний
Нержавеющая сталь	Хлориды
Высокопрочные стали	Водород

Хорошо известными материалами, проявляющими склонность к коррозионному растрескиванию в среде хлоридов, являются аустенитные нержавеющие стали, содержащие хром и никель (легирование никелем в количестве 9-12% переводит сталь в аустенитный класс), и определенные алюминиевые сплавы. Вообще, склонность к коррозионному растрескиванию повышается при повышении температуры. Для определенных сплавов может быть определена комбинация среды при конкретной температуре, ниже которой склонность к растрескиванию практически равна нулю.

В морских конструкциях большинство горячих трубопроводов из нержавеющей стали струйно очищается мелким неметаллическим абразивом и покрывается эпоксидным покрытием. Это делается для снижения вероятности коррозионного растрескивания, особенно на изолируемых трубопроводах из нержавеющей стали, работающих при температуре выше 60°C.

Каким образом можно управлять коррозионно-механическим растрескиванием:

- Выбором материала, который не подвержен влиянию окружающей среды и обеспечения того, чтобы любые изменения в окружающей среде, вызванные очисткой и т.д., не приводили к коррозионно-механическим растрескиваниям.
- Контролируя рабочие напряжения за счет тщательной разработки и сведения к минимуму концентрации напряжений, чтобы их значения были ниже критических. Остаточные напряжения могут быть уменьшены путем термической обработки и тщательного планирования производства.
- Использованием ингибиторов коррозии во время выполнения операций по очистке или контролирование окружающей среды в замкнутой системе.
- Путем нанесения защитного покрытия на материал, чтобы эффективно изолировать материал от окружающей среды.

3.2.3.8. Коррозионная усталость.

Коррозионная усталость – преждевременное растрескивание металла при одновременном действии и коррозии, и многократных циклических нагружений при более низких уровнях нагрузок или меньших количествах циклов, чем требуется для того, чтобы вызвать усталость этого металла при отсутствии агрессивной среды.

Обычная практика включает в себя быстро меняющиеся напряжения, которые могут быть значительно ниже предела прочности при растяжении. Если напряжения увеличиваются, уменьшается количество циклов, требуемых для того, чтобы вызвать коррозионную усталость.

Как и в случае коррозионно-механического растрескивания, коррозионная усталость зависит от взаимодействия между нагрузкой, окружающей средой и металлургическими факторами.

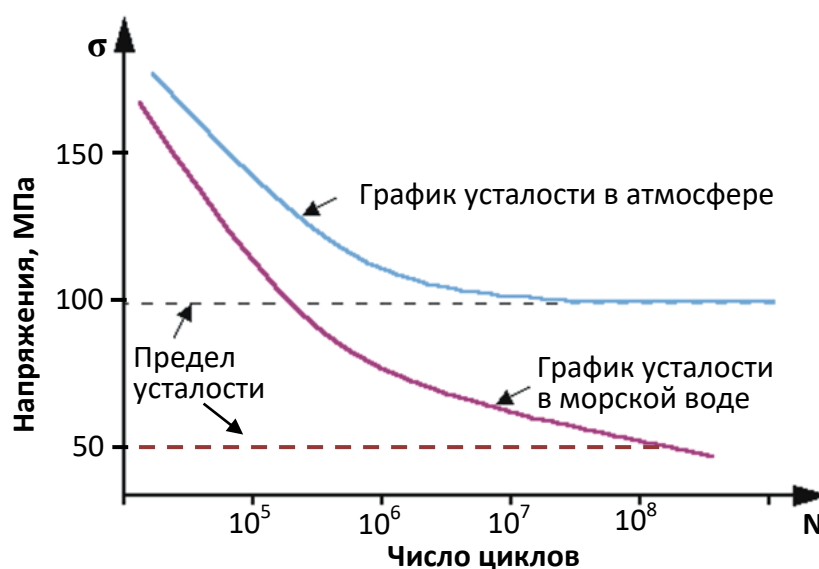


Рисунок 3.19 – Влияние коррозии на кривую усталости.

Усталостная прочность материала, или предел усталости (усталостная долговечность при заданном максимальном

значении напряжения), как правило, уменьшается в присутствии агрессивной среды. Для большинства технических сплавов, предел усталости относится к уровню напряжения, ниже которого не происходит усталостное разрушение в течение определенного числа циклов, обычно 10^7 или 10^8 циклов, как показано на рис. 3.19.

Коррозионная усталость может быть предотвращена путем уменьшения:

- усталости путем минимизации колебаний напряжений и вибрации.
- коррозии применением высокоэффективных сплавов, устойчивых к коррозионной усталости;
- коррозии с помощью покрытия и ингибиторы отложить начало коррозии усталостных трещин;
- снижения коррозии с помощью ингибиторов и покрытий, способных задержать начало образования трещин вследствие коррозионной усталости материалов

3.2.4. Уровень значимости различных видов коррозии.

Из двух общих видов коррозии, местная коррозия имеет большое значение с точки зрения необходимости внепланового технического обслуживания объекта. Локальная коррозия часто скрыта (т.е., находится в щелях или под несколькими слоями ремонтного покрытия), так что истинная степень повреждения невидима. Из-за риска быстрого проникновения вглубь металла, локальная коррозия может привести к серьезным последствиям, если ее не обнаружить и не принять необходимые меры в кратчайшие сроки.

Локальная коррозия также образует на поверхности острые формы, которые служат в качестве «концентраторов напряжений». Эти концентраторы приводят к повышению уровня локальных напряжений на переднем краю полости или щели, выступающей в качестве точек, инициирующих разрушение.

3.3. Коррозия и ее последствия.

Значение коррозионных последствий определяется тремя аспектами:

- экономический;
- надежность и безопасность;
- внешний вид.

3.3.1. Экономические последствия коррозии.

Коррозия приводит ежегодно к миллиардным убыткам, и решение этой проблемы является важной задачей.

В США по данным NACE в 1994 г. ущерб от коррозии и затраты на борьбу с ней составили около 300 млрд долларов, что составляет 4,5 % от ВВП. В Германии этот ущерб составил 2,8 % от ВВП. По оценкам специалистов различных стран эти потери в промышленно развитых странах составляют от 2 до 4 % валового национального продукта. При этом потери металла, включающие массу вышедших из строя металлических конструкций, изделий, оборудования, составляют от 10 до 20 % годового производства стали.

Основной ущерб, причиняемый коррозией, заключается не в потере металла как такового, а в огромной стоимости изделий, разрушаемых коррозией. Вот почему ежегодные потери от неё в промышленно развитых странах столь велики.

Истинные убытки от неё нельзя определить, оценив только прямые потери, к которым относятся стоимость разрушившейся конструкции, стоимость замены оборудования, затраты на мероприятия по защите от коррозии.

Стоимость повторной покраски и ремонт поржавевших сталей, как правило, намного превышает первоначальную стоимость защиты поверхности от коррозии.

Подсчитано, что от 15 до 30% этих потерь можно избежать, своевременно используя постоянно совершенствуемые средства противокоррозионной защиты.

Ещё больший ущерб составляют косвенные потери. Это простои оборудования при замене проржавевших деталей и узлов, утечка продуктов, нарушение технологических процессов.

Гораздо труднее поддаются подсчету **косвенные потери**, но даже по приближенной оценке они исчисляются миллиардами долларов. Приведем примеры косвенных потерь.

3.3.2. Последствия коррозии – надежность и безопасность.

Проржавевшие конструкции могут потерять надежность и безопасными в различных формах.

Элементы конструкций зданий и сооружений должны выдерживать экстремальные нагрузки. Повреждения их коррозией приводят к утонению и к частичному снижению или полной потере их несущей способности.

Для конструкций и оборудования, которые в результате коррозии могут разрушаться с катастрофическими последствиями, например сосуды высокого давления, паровые котлы, металлические контейнеры для токсичных материалов, лопасти и роторы турбин, мосты, резервуарами, трубопроводами в нефтегазовой и химической промышленности, энергетические объекты, ТЭС, ГЭС, АЭС, системы захоронения радиоактивных отходов и т.п., надежность антикоррозионной защиты является важнейшим условием их безопасной эксплуатации.

Коррозионный отказ таких объектов может привести к взрывам, масштабным пожарам и большим экологическим последствиям, или жертвам работающего персонала или размещенного вблизи населения.

Коррозия не допускается также в технологических резервуарах, контейнерах и трубопроводах пищевой промышленности, где продукт коррозии металла будет загрязнять пищевые продукты.

Для защиты таких объектов часто применяются покрытия и облицовки, которые должны обеспечить надежную защиту от коррозии, но вместе с этим, и обеспечить чистоту пищевых продуктов от загрязнения собственным составом.

Примером крупномасштабных последствий коррозии может служить происшествие, случившееся в декабре 1967 года с норвежским рудовозом «Anatina», следовавшим из Кипра в Осаку. Налетевший тайфун привёл к попаданию в трюмы солёной воды и образованию большой гальванической пары: медного концентрата со стальным корпусом судна, который вскоре размягчился, и судно подало сигнал бедствия. Экипаж был спасён подоспевшим немецким судном, а сама «Anatina» с трудом добралась до порта.

3.3.3. Последствия коррозии – внешний вид.

Отслоение покрытий и поржавевшая сталь портят внешний вид любого объекта. Для многих инженеров и владельцев объектов плохой внешний вид является одной из основных причин для обновления покрытия их конструкций.

По всем вышеперечисленным причинам, защита от коррозии чрезвычайно важна.

3.4. Защита от коррозии.

Несмотря на то, что борьба с коррозией не является легкой задачей, тем не менее, у проектировщика есть ряд инструментов, позволяющих эффективно решать такую задачу:

- конструкторские решения;
- применение ингибиторов коррозии;

- выбор конструкционного материала;
- применение катодной защиты;
- системы защиты внешним током;
- выбор защитных покрытий;
- изменение окружающей среды.

3.4.1. Конструкторские решения.

Проектирование конструкций с точки зрения защиты от коррозии должно предусматривать:

- исключение возможности накапливания воды, химических солей и других веществ, которые могут способствовать образованию «очагов коррозии». Очаги коррозии – это участки, способствующие ускоренному коррозии. Их также часто называют «критическими зонами».
- устранение сложных форм (например, установленных вплотную друг к другу уголков) и ориентации элементов, которые могли бы служить в качестве «ловушек» воды и пыли;
- обеспечение доступа для работ по техническому обслуживанию, что позволит техническому персоналу внедрять систему обследования и контроля состояния конструкций.
- устранение острых кромок, щелей и других трудно поддающихся защите от коррозии элементов.

Подробности о требованиях к проектным решениям будут изложены далее в курсе.

3.4.2. Ингибиторы коррозии.

Ингибитор коррозии – это вещество, которое при добавлении в коррозионную среду снижает скорость коррозии. Ингибиторы коррозии обычно добавляют в небольших количествах в электролит, наиболее часто в замкнутых системах, таких как трубопроводы..

По механизму действия ингибиторы разделяют на анодные, катодные и смешанные, в зависимости от того, какую сопряженную реакцию коррозионного процесса они тормозят. По составу они могут быть органические и неорганические.

Летучие ингибиторы применяют обычно для временной защиты ответственных механизмов и систем. По сравнению с временными покрытиями они просты при использовании и не требуют расконсервации. К недостаткам относятся возможность усиления коррозии ряда цветных металлов и необходимость герметизации объемов с защищаемыми изделиями для предотвращения улетучивания ингибитора. Обычно летучие ингибиторы применяют в качестве пропитки или в виде слоя, нанесенного на бумагу, или в виде порошка, которые испаряются, насыщая замкнутый объем парами ингибитора защитной концентрации. Чаще других в качестве летучих ингибиторов используются органические соли аминов (нитриты, карбонаты).

Водорастворимые ингибиторы используются не только в качестве временной защиты, но и в периоды эксплуатации объектов. В частности, на судах они находят применение для защиты систем охлаждения судовых двигателей и балластных цистерн. Иногда водорастворимые ингибиторы используются в процессах гидро- и гидроабразивной очистки поверхности металла перед окраской. Для этих целей обычно применяются нитритно-хроматная, хроматно-щелочная и нитритно-щелочная присадки или органические эмульсионные присадки.

Малорастворимые ингибиторы используют как противокоррозионные присадки в составе консервационных масел и смазок, а также рабочих масел на период эксплуатации оборудования или внутренних полостей резервуаров.

3.4.3. Системы катодной защиты.

Катодная защита от коррозии (более подробно обсуждается во втором уровне этих курсов) использует аноды, изготовленные из более активных металлов, таких как алюминий, цинк или магний. При подключении к погруженной стальной конструкции, подвергаемой защите, эти

аноды подвергаются коррозии в первую очередь по отношению к стальной конструкции. Сталь считается катодно-защищенной, а анод называют жертвенным. Когда анод полностью истощается, он должен быть заменен. Катодная защита от коррозии в морской среде часто используется без защитных покрытий. С применением защитных покрытий требуемое количество анодов, а, следовательно, и общая стоимость катодной защиты существенно снижается.

На этом принципе основана, например, защита железных изделий от коррозии путём оцинковки – цинк имеет более отрицательный потенциал, чем железо, поэтому в такой паре железо восстанавливается, а цинк должен корродировать. Однако в связи с образованием на поверхности цинка оксидной плёнки процесс коррозии сильно замедляется.

Альтернативная форма катодной защиты – защита под действием электрического внешнего источника тока. Подаваемый ток, обеспечивая внешний источник, чтобы компенсировать ток коррозионного элемента. Поскольку системы защиты подаваемым током не нашли широкого применения в современных системах для защиты морских сооружений, они не рассматриваются в данном курсе.

3.4.4. Системы защитных покрытий.

Защитные покрытия представляют собой наиболее распространённую и широко используемую систему защиты от коррозии для морских сооружений. Механизм защиты варьируется в зависимости от конкретно используемых материалов. Выбранный механизм может изолировать подложку, защищая ее от окружающей среды (т.е. электролита). Такой механизм, более известен как барьерная «защита».

На эффективность системы защитных покрытий, в значительной степени могут влиять следующие факторы:

- нарушение сплошности пленки защитных покрытий;
- тип системы защитных покрытий;
- толщина системы защитных покрытий;
- свойства электролита;
- наличие прокатной окалины и других твердых отложений.

3.4.5. Выбор конструкционных материалов.

Существуют альтернативы конструкционным материалам, которые могут подвергаться коррозии не так быстро, как сталь. В некоторых случаях может потребоваться выбор коррозионностойкого материала для применения на проектируемой конструкции.

Как уже отмечалось ранее в этой главе, гальванический ряд представляет собой список материалов в порядке возрастания их потенциалов коррозии. Наиболее легко корродируемые материалы (наиболее активные) находятся в верхней части гальванического ряда, и наименее легко корродируемые (менее активные) находятся в нижней части.

При выборе металлов и сплавов, подлежащих соединению, необходимо подбирать металлы или сплавы так, чтобы при соединении свести до минимума разность потенциалов пары.

3.4.6. Изменение окружающей среды.

Среда, чаще всего конструкций верхнего строения на морских объектах, может быть изменена, чтобы сделать ее менее коррозионно-активной. В первую очередь это означает осушение воздуха в период нанесения покрытий, которое рассматривается во втором уровне этих курсов. Несмотря на то, что это обычная практика для применения внутри помещений или временно установленных защитных шатров, она не играет большой роли в постоянной борьбе с коррозией.

3.5. Программа борьбы с коррозией.

Владельцы промышленных объектов имеют дело с коррозией путем создания и поддержания программ по борьбе с ней. Отдельные программы отличаются в деталях, но в целом решают большинство или все факторы, в следующем списке:

- квалификация и спецификация материалов, используемых в системах защиты от коррозии;
- технические требования к степени подготовки поверхности
- выбор правильной системы защиты от коррозии для каждого элемента конструкции;
- оценка и отбор подрядчиков по нанесению;
- управление качеством – обеспечение и контроль;
- квалификация и выбор инспекционных фирм для антикоррозионных работ;
- квалификация и выбор инспекционных фирм по эксплуатационному контролю коррозии;
- планирование обследований;
- управление данными, полученными по результатам обследований;
- планирование и проектирование мероприятий по техническому обслуживанию;
- выполнение мероприятий по техническому обслуживанию;
- оценка общей эффективности программы борьбы с коррозией.

Основные термины и определения.

1) **Коррозия** – физико-химическое взаимодействие между металлом и средой, в результате которого изменяются свойства металла и которое может привести к серьезному ухудшению функциональных характеристик металла, среды, или включающей их технической системы. Это взаимодействие обычно имеет электрохимическую природу.

2) **Коррозионная система** – система, включающая один или более металлов и те составляющие среды, которые влияют на коррозию.

3) **Электролит** – среда, в которой электрический ток переносится ионами.

4) **Электрод** – электронный проводник в контакте с электролитом.

5) **Электродная реакция** – реакция на границе фаз, эквивалентная переносу заряда между электронным проводником и электролитом.

6) **Анод** – электрод, на котором преобладает анодная реакция ионизации металла (окислительная реакция).

7) **Анодная реакция** – электродная реакция (5), эквивалентная передаче положительного заряда от электронного проводника (анода) к электролиту (3). Ток протекает от электронного проводника к электролиту. Анодная реакция есть процесс окисления (8).

8) **Окисление** – процесс, в котором реагент теряет один или более электронов.

9) **Катод** – электрод (4), на котором преобладает катодная реакция (10).

10) **Катодная реакция** – электродная реакция (5), эквивалентная передаче отрицательного заряда от электронного проводника к электролиту (3). Ток имеет техническое направление из электролита в электронный проводник. Катодная реакция есть процесс восстановления (11)

11) **Восстановление** – процесс, в котором реагент принимает один или более электронов.

12) **Гальванический элемент** – комбинация двух разных электродов (4), соединенных электролитом (3). Гальванический элемент является химическим источником электрического тока и производит ток, когда электроды соединены внешним проводником.

13) **Коррозионный элемент (пара)** – короткозамкнутый гальванический элемент (12) в коррозионной системе (2), одним из электродов (4) которого является корродирующий металл. Различают: макроэлементы с расстоянием между анодом (6) и катодом (9) от миллиметров до нескольких километров и микроэлементы с микроскопическими размерами.

14) **Электродный потенциал** – напряжение, измеряемое во внешней цепи между данным электродом (4) и электродом сравнения, находящимися в контакте с одним и тем же электролитом (3).

15) **Потенциал коррозии** – электродный потенциал (14) металла в данной коррозионной системе (2). Термин используется независимо от того, течет или не течет электрический ток к рассматриваемой поверхности или от нее.

16) **Катодная защита** – электрохимическая защита, основанная на уменьшении потенциала коррозии (15) до уровня, при котором скорость коррозии металла существенно уменьшается. Катодная защита – метод уменьшения коррозии металлической поверхности, переводя ее в катод коррозионного элемента (13).

17) **Ингибитор коррозии** – химическое вещество, которое, присутствуя в коррозионной системе (2) в определенной концентрации, снижает скорость коррозии без существенного изменения концентрации коррозивных агентов. Ингибитор коррозии обычно эффективен в малой концентрации.

18) **Щелевая коррозия** – локальная коррозия (21), связанная с и протекающая внутри или непосредственно вокруг узкого отверстия или зазора между металлической и любой другой поверхностью (металлической или неметаллической).

19) **Гальванический ряд** – ряд металлов, расположенных соответственно их потенциалам коррозии (15) в отсутствии (внешнего) электрического тока при определенных условиях. Могут быть включены и другие электронные проводники.

20) **Сплошная коррозия** – коррозия (1), протекающая на всей поверхности металла, подверженной воздействию коррозионной среды.

21) **Местная коррозия** – коррозия (1), сконцентрированная преимущественно на отдельных участках поверхности металла, подверженной воздействию коррозионной среды.

22) **Прокатная окалина** – твердый слой продуктов коррозии, образовавшийся на металле при высокой температуре.

23) **Пассивация** – понижение скорости коррозии пассивирующим слоем (тонким, плотно прилегающим, защитным слоем, образованным на поверхности металла в результате реакции металла со средой). Неполная пассивация может привести к локальной коррозии.

24) **Питтинговая коррозия** – локальная коррозия (21), ведущая к образованию язв, т.е. полостей, идущих от поверхности вглубь металла.

25) **Обратная цепь** – электронный проводник, соединяющий анод и катод, обеспечивая прохождение электронов, генерируемых на аноде, к катоду.

Руководство по изучению раздела.

1. **Определения коррозии:** Коррозионная система; Коррозия материала; Коррозия металлов; Коррозионный эффект или коррозионное разрушение; Коррозионная порча. Задача защиты от коррозии.
2. **Пассивация металла:** Определение; Пассивация железа.
3. **Превращение металлов в природе:** Энергетические уровни железа (Fe). Превращение железной руды в железо. Планетарная модель строения атома железа. Превращение железа в ионы Fe^{+2} или Fe^{+3} . Превращение двухвалентных и трёхвалентных ионов железа в оксиды/минералы.
4. **Коррозия металла как электрохимический процесс:** Коррозионный (гальванический) элемент; Анод; Катод; функция обратной цепи; Электролит и его функция; Борьба с коррозией; Пассивация металлов.
5. **Этапы окислительно-восстановительной реакции коррозии железа:** Анодная реакция; Катодная реакция; Реакции в электролите.
6. **Прокатная окалина:** Образование, Толщина, Состав, Свойства, Влияние на коррозионный процесс.
7. **Гальванический ряд металлов:** Электродный потенциал; Потенциал коррозии; Стандартный водородный электрод; Стандартный электродный потенциал; Гальванический ряд (активные и благородные металлы).
8. **Факторы, влияющие на скорость коррозии:** Влажность воздуха; Содержание кислорода на поверхности материалов; Наличие напряжений в металле; Другие металлы или металлические соединения; Загрязняющие вещества – Пары и газы в воздухе, Кислые газы (CO_2), Содержание химических солей, Твердые инертные частицы; Температура окружающей среды.
9. **Типы окружающей среды по степени увлажнения поверхности:** Сухая, влажная и мокрая атмосферная коррозия; Коррозия при полном погружении.
10. **Атмосферно-коррозионные категории среды:** Коррозионная категория атмосферы; Количественное определение атмосферно-коррозионной категории среды; Качественное оценивание атмосферно-коррозионной категории среды; Методология классификации атмосферно-коррозионной категории среды;
11. **Коррозия в воде и почве:** Факторы, влияющие на коррозию конструкций, погруженных в воду; Зоны погружения в воду; Факторы, влияющие на коррозию конструкций, заглубленных в грунт; Коррозионные категории для воды и грунта в стандартах ISO.
12. **Виды коррозии:** Сплошная (равномерная) коррозия.
13. **Местная (неравномерная) коррозия:** Питтинговая коррозия; Межкристаллитная коррозия; Щелевая коррозия; Эрозионная коррозия; Кавитационная коррозия; Гальваническая коррозия; Коррозионно-механическое растрескивание; Коррозионная усталость.
14. **Уровень значимости различных видов коррозии.**
15. **Защита от коррозии:** Конструкторские решения; Ингибиторы коррозии; Системы катодной защиты; Системы защитных покрытий; Выбор конструкционных материалов; Изменение окружающей среды.
16. **Программа борьбы с коррозией.**