МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФГБОУ ВО «КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра строительных материалов

Методы повышения долговечности металлических строительных изделий и конструкций

Казань – 2017

Составитель: Р.Р. Сагдиев

УДК 691
ББК 30.3

Методические указания к выполнению практических занятий, курсовой работы и самостоятельной работы студентов для студентов по направлению 08.04.01 Строительство / Сост. Р.Р. Сагдиев: КГАСУ, 2017.

Методические указания к выполнению практических занятий, курсовой работы и самостоятельной работы студентов содержит материалы, необходимые для выполнения расчета долговечности металлических конструкций различными методами.

Составлены в соответствии с Государственным образовательным стандартом по направлению 08.04.01 Строительство

© Казанский государственный архитектурно-строительный университет, 2017 г.

СОДЕРЖАНИЕ

1. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ О НАДЕЖНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ 4
2.ТЕРМОДИНАМИКА КОРРОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ 10
2.1. МЕХАНИЗМ ГАЗОВОЙ КОРРОЗИИ 11
2.2. МЕХАНИЗМ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ КОРРОЗИИ 12
3. КОРРОЗИЯ МЕТАЛЛОВ В ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДАХ 17
3.1. КОРРОЗИЯ МЕТАЛЛОВ В ПРИРОДНЫХ СРЕДАХ 18
4. УЧЕТ ТРЕБОВАНИИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИИ 25
5. СОСТАВ И ОФОРМЛЕНИЕ КУРСОВОЙ РАБОТЫ 61
6. ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ 66

1. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ О НАДЕЖНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Несущие строительные конструкции промышленных зданий в отличие от станков и оборудования почти не подвержены моральному износу. Конструкции эксплуатируются десятки лет, и вопрос о их надежности и особенно долговечности достаточно важен, а длительный срок эксплуатации конструкций заметно осложняет прогнозирование надежности и долговечности, делая этот вопрос весьма сложным. Большинство конструкций не требует какой-либо модернизации за весь срок эксплуатации, но иногда в связи с модернизацией производства, размещенного в здании, для обеспечения надежности и повышения долговечности необходима реконструкция (усиление) несущих элементов каркаса.

Учитывая, что строительные конструкции составляют значительную часть основных фондов производства, исследование их качества во время эксплуатации имеет важное народнохозяйственное значение.

Надежность строительных конструкций обеспечивается качеством проектирования (и норм проектирования), материалов, изготовления, монтажа и условиями эксплуатации. Качество может быть представлено в виде многомерного пространства качества, след поверхности которого при пересечении его плоскостью показан на рис. 1.1.

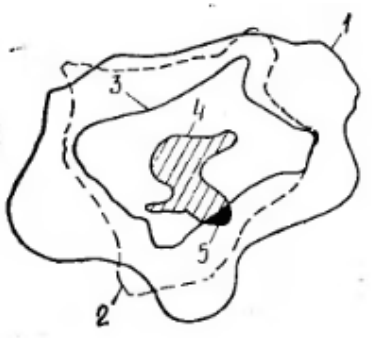


Рис. 1.1 Следы пространств качества и состояний

ГОСТ 13377-75 «Надежность в технике. Термины и определения» называет надежностью «свойство изделия выполнять заданные функции, сохраняя свои эксплуатационные показатели в заданных пределах в течение требуемого промежутка времени или требуемой наработки», а долговечностью — «свойство сохранять работоспособность до предельного состояния с необходимыми перерывами для технического обслуживания и ремонтов». Нарушение работоспособности называется отказом, а отклонение от хотя бы одного требования технических условий — неисправностью. Надежность численно оценивается вероятностью безотказной работы (и др. показателями), а долговечность— ресурсом или сроком службы.

При проектировании качество прогнозируется, т. е, можно представить проектное пространство качества *1*. Отклонения от прогнозов, возникшие в силу несовершенства норм проектирования, а также в связи с изменчивостью свойств материалов, качества изготовления и монтажа, приводит к тому, что начальное пространство *2* отличается от проектного. Эти два пространства не зависят от времени, но их объем должен учитывать прогнозируемую долговечность. Накопление повреждений в сооружениях происходит из-за неблагоприятных механических и химических

воздействий, и пространство качества сжимается. Эксплуатационное качество *3* переменно во времени и изменяется при ремонтах. Внутри этих пространств находится пульсирующее пространство состояния *4,* поверхность которого зависит от внешних воздействий в данный момент времени. Пересечение поверхностей эксплуатационного качества и состояния *5* является отказом или неисправностью (которую иногда называют частичным отказом). Координатные оси пространств не равноценны с точки зрения пересечения поверхностей по их направлению. Пересечения могут приводить к авариям, к прекращению эксплуатации с капитальным ремонтом, к затруднению эксплуатации, к появлению мелких дефектов и неисправностей, устраняемых при текущих ремонтах. Сокращение объема проектного пространства качества, обеспечивающее экономию средств на возведение здания и сооружений, возможно до полного совпадения поверхности проектного качества и поверхности, описывающей наибольший за срок эксплуатации объем пространства состояния.

Анализ надежности реальных сооружений и даже их расчетных схем достаточно сложен. Например, при загружении расчетной схемы поперечной рамы каркаса промздания может возникать большое число различных неисправностей и несколько путей появления отказа.

Первый вид неисправности — достижение предела несущей способности и потеря устойчивости одной из колонн (1 на рис. 1.2).

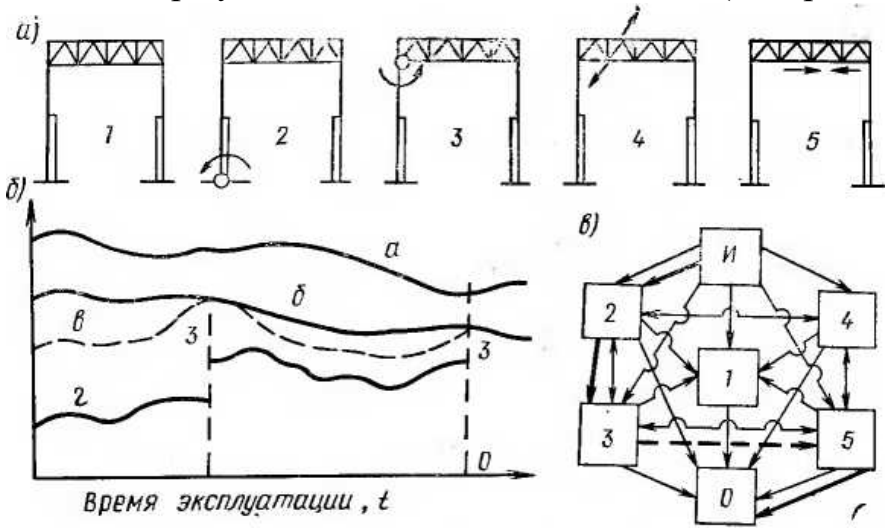


Рис. 1.2. Возможный путь к отказу цепи из двух элементов

а, б — уровни надежности колонны и фермы; *в, г* — изменение загрузки фермы и колонны; *з, 1, О* — неисправности и отказ; *1*—5 — виды неисправностей

Вероятность появления этой неисправности зависит от геометрических характеристик колонны (с учетом их случайных отклонений) и напряженного состояния колонны, которое будет случайным. После потери устойчивости система, теоретически оставаясь геометрически неизменяемой, будет еще работоспособной. Однако усилия в других

элементах при этом резко возрастут, и это приведет к отказу всей системы (рис. 1.2, *в).*

Второй вид неисправности — образование шарниров пластичности в жестких узлах рамы *(2, 3* на рис. 1.2). Вероятность этих отказов зависит от конструкции узлов, материала, качества изготовления и монтажа, интенсивности их загружения. При этих неисправностях система может еще сохранять работоспособность до появления новых неисправностей.

Третий вид неисправностей — потеря несущей способности стержнями сквозного ригеля из-за потери устойчивости, достижения предела текучести или разрушения присоединения к фасонке. Вероятность этих неисправностей зависит от геометрических характеристик сечений, статистических характеристик стали и в значительной степени от начальных искажений формы стержней (искривления, отсутствия центраций и т. п.). Возможные последовательности от исправной конструкции *И* к отказу *О* показаны на рис. 1.2, *в.*

Каждому из возможных путей соответствует своя вероятность. При анализе надежности системы ее обычно представляют в виде цепи последовательно и параллельно соединенных элементов. При последовательном соединении выход из строя одного элемента эквивалентен отказу всей системы. При параллельном соединении предполагается, что хотя бы один из элементов будет работать и выходу из строя всей системы будет соответствовать отказ всех элементов, в нее входящих (пример — жирная линия на рис. 1.2, *в).* При известных вероятностях безотказной работы элементов достаточно просто можно определить вероятность безотказной работы всей системы (особенно если элементы независимы).

При оценке надежности строительных конструкций решение усложняется тем, что загрузка элементов, параллельно соединенных, как правило, зависима, а выход из строя одного из элементов изменяет загрузку других. Если рассмотреть систему, состоящую всего из двух параллельно соединенных элементов, то могут появиться достаточно различные случаи работы системы. Например, на рис. 1.2, *б* показано одно из возможных поведений системы колонна — ферма при пути к отказу *И—3—1—О.* При образовании пластического шарнира в кривой загрузки колонны появляется скачок. Если при скачке кривая загрузки колонны не достигает уровня надежности колонны, то система остается работоспособной, но кривая загрузки колонны изменяет закономерность. Пластический шарнир в дальнейшем может закрыться и система будет работать до тех пор, пока скачок в загрузке колонны не достигнет уровня надежности.

После достижения предельного уровня загрузкой элемента *1* система остается еще геометрически неизменяемой, но при этом загрузка фермы

настолько возрастет, что с этим остатком несущей способности можно не считаться, т. е. считать вероятность безотказной работы элемента *5* равной нулю.

Таких путей, как было показано выше, может быть много, но, в принципе, можно перебрать все возможные пути пересечения поверхностей качества и состояния (в том числе не только с точки зрения прочности и устойчивости) и, зная условные вероятности отказа при каждом из возможных случаев, вычислить полную вероятность отказа системы.

Даже анализ плоской расчетной схемы с точки зрения прогнозирования надежности — весьма сложная задача, требующая умения оценить состояние этой системы в любой момент времени. Действительные конструкции значительно сложнее, чем их расчетные схемы, так как в цепи элементов включаются и связи между плоскими системами, и ограждающие конструкции, а на действительное состояние влияет очень много различных факторов. Это затрудняет использование вероятностного метода расчета, при котором сооружение считается надежным, если вероятность пересечения пространств качества и состояния не превышает какой-то заданной величины и заставляет в инженерной практике прибегать к упрощенным способам оценки и прогнозирования надежности, к так называемым методикам расчета.

Проблема оценки надежности зданий и сооружений возникла в древнейшие времена, в период начала строительства простейших жилищ. Достаточно долго она решалась методом проб и ошибок. Только с XV в. начались попытки аналитически прогнозировать надежность отдельных элементов сооружений (Леонардо да Винчи—опыты по определению прочности некоторых конструкций и строительных материалов; Галилео Галилей — попытки аналитически установить размеры сжатых, растянутых и изгибаемых элементов; Кулон — решение задачи о предельном равновесии подпорных стенок и др.). Только в начале XIX в. Навье в книге о сопротивлении материалов предложил достаточно общий критерий оценки надежности несущих конструкций. Конструкция считалась надежной, если ни в одной ее точке напряжение не превысило рабочего (безопасного). Впоследствии достаточно низкие рабочие напряжения были заменены более высокими, названными допускаемыми. Метод допускаемых напряжений полностью сформировался к 30-м годам нашего века. Надежность в этом методе оценивалась по формуле:

$$f\left(\sum_{i=1}^{n} \alpha_l P_l \, n_{c,l}/\beta_l\right) = \sigma_{\text{усл}} \le |\sigma| = \frac{\sigma_{\text{пред}}}{k}, \qquad (1.1)$$

где α, β — геометрические факторы конструкции и сечения; P — нагрузка; k — коэффициент запаса; $n_{c,l}$ —коэффициент сочетания.

Здесь надежность считалась обеспеченной, если некоторое условное (в том числе и с учетом продольного изгиба) напряжение ни в одной точке конструкции не превысило допускаемого [σ]. В этом методе было заложено много различных допущений. Так, коэффициенты α определялись с помощью упрощенных (расчетных) схем, использовался принцип независимости действия сил, работа конструкции до достижения $\sigma_{\text{пред}}$ считалась упругой, нагрузки и их сочетания определялись детерминистически. Несколько произволен был и выбор решающего фактора для приведения функции к условному напряжению, т. е. выбор той или другой теории прочности. Недостатки метода привели к тому, что начались попытки изменить основные предпосылки расчета. Эти работы можно подразделить на три направления: 1) теоретическое решение задач для упругопластических материалов; 2) изучение распределения внутренних усилий при разрушении (без изучения предыдущей работы конструкции); 3) учет того объективного фактора, что свойства материалов, нагрузки и другие расчетные факторы — случайные величины и функции.

Первое направление привело к созданию теории пластичности, второе— к разработке нового подхода к оценке надежности. Нормы 1938 г. регламентировали расчет железобетонных и каменных конструкций по разрушающим нагрузкам, т. е. сооружение или конструкция считались надежными, если ни в одном из сечений не достигнуто предельное равновесие (вводился и некоторый запас). Наконец, работы третьего направления были посвящены сбору данных (и их анализу) о изменчивости свойств материалов, нагрузок и других факторов, влияющих на надежность. Работы второго и третьего направлений привели к тому, что первое издание СНиП (1954 г.) ввело методику расчета по предельным состояниям, по которой конструкция считается надежной, если не достигнуто ни одно из возможных предельных состояний. В настоящее время по методике предельных состояний проектная надежность оценивается по формуле:

$$f\left(n_c \sum_{l=1}^{n} \frac{\alpha_l}{\beta_l}\, n_i P_l n_{c,l}\right) = \sigma_{\text{усл}} \le m \frac{1}{k_{\text{н}}} \frac{1}{k_{\text{м}}} = R^{\text{н}}, \qquad (1.2)$$

где $\sigma_{\text{усл}}$ — условное напряжение (или перемещение); n, n_c — коэффициенты перегрузки и сочетаний; m , $k_{\text{н}}$ — коэффициенты условий работы и надежности; $k_{\text{м}}$ — коэффициенты безопасности по материалу; $R^{\text{н}}$ — нормативное сопротивление материала (или нормативное перемещение).

Значительная часть предпосылок и допущений метода расчета по допускаемым напряжениям осталась и в методике расчета по предельным состояниям, но введение системы коэффициентов способствует тому, что конструкции при достаточной их надежности становятся менее материалоемкими. Коэффициенты методики определяются с учетом случайной изменчивости расчетных факторов, и с этой точки зрения

методику расчета конструкций по предельным состояниям часто называют полувероятностной.

Решения задач теории надежности, приведенные в книге, выполнены в линейной постановке, т. е. рассмотрено в основном поведение конструкций в направлении одной из координатных осей пространств качества и состояния. Это позволяет приближенно оценить надежность, выявить некоторые резервы долговечности и уточнить расчет конструкций по методике предельных состояний. В более общей постановке, при которой еще трудно получить много практических результатов, решения задач теории надежности приводятся в [11, 96].

2. ТЕРМОДИНАМИКА КОРРОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

Критерием самопроизвольного разрушения металлов в коррозионной среде является уменьшение энергии Гиббса системы ($\Delta G<0$).

Для случая *химической коррозии* в газах, например, в атмосфере кислорода, уравнение реакции окисления металлов можно записать в общем виде:

$$n\text{Me (к)} + 0{,}5m\ \text{O}_2\text{ (г)} = \text{Me}_n\text{O}_m\text{ (к)}, \qquad (2.1)$$

Энергия Гиббса образования простых веществ равна нулю, поэтому термодинамическая возможность газовой коррозии металлов определяется стандартным значением энергии Гиббса образования ($\Delta f°G$) оксидов (справочные данные), температурой эксплуатации металла и давлением газа-окислителя по уравнению изотермы Вант-Гоффа:

$$\Delta G = \Delta G° - 0{,}5m\ RT \ln \bar{p}_{O_2}, \qquad (2.2)$$

где $\Delta G°$ – изменение стандартной энергии Гиббса реакции; $\bar{p}_{O_2}$ – относительное парциальное давление кислорода (p/100) (p в кПа).

Изменение энергии Гиббса *электрохимического процесса* непосредственно связано с электродвижущей силой гальванического элемента:

$$\Delta G = - nFE, \qquad (2.3)$$

где n – число электронов, принимающих участие в реакции; $E = \varphi_к - \varphi_а$– электродвижущая сила (ЭДС) коррозионного элемента; $\varphi_к$ и $\varphi_а$ – электродные потенциалы катодного и анодного процессов соответственно.

Очевидно, что протекание самопроизвольного электрохимического коррозионного процесса возможно, если $\varphi_к - \varphi_а > 0$, т.е. при $\varphi_к > \varphi_а$.

*Аэрация – омывание воздухом, кислородом.

Таким образом, для электрохимического растворения металла необходимо присутствие окислителя, электродный потенциал которого положительнее электродного потенциала металла.

2.1. МЕХАНИЗМ ГАЗОВОЙ КОРРОЗИИ

Окисление металла кислородом воздуха протекает в несколько стадий:

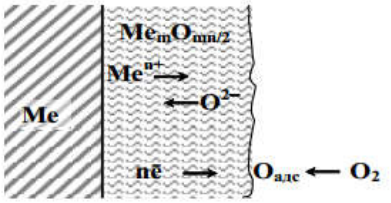


Рис. 2.1 Схема процесса образования оксидной пленки на металле

1) ионизация металла и переход его в форме ионов и электронов в слой оксида;
2) перенос кислорода из газового потока к поверхности оксида (рис. 1);
3) адсорбция кислорода на поверхности;
4) превращение адсорбированного кислорода в ион O^{2-} ;
5) перемещение ионов O^{2-}в слое оксида;
6) образование оксида.

Молекулы кислорода самопроизвольно адсорбируются на поверхности металла. Тепловой эффект адсорбции кислорода имеет тот же порядок, что и теплота образования оксида. Поэтому адсорбцию кислорода можно рассматривать как химическое взаимодействие O_2поверхностью металла. Химическая связь между адсорбированным кислородом и металлом имеет ионный характер. Электроны металла притягиваются к атомам кислорода, восстанавливая их до анионов O^{2-}. Когда взаимное расположение катионов металла и анионов O^{2-} будет отвечать структуре кристаллической решетки оксида, на поверхности металла образуется оксидная пленка.

Отличительной особенностью газовой коррозии металла является в отдельных случаях затухание процесса во времени. Это происходит в том случае, если продукты коррозии образуют на поверхности металла сплошную пленку, изолирующую его от агрессивной среды.

Критерий сплошности впервые был сформулирован Пиллингом и Бедвордсом. Условие сплошности выполняется, когда молекулярный объем химического поверхностного соединения (например, оксида) больше объема металла, израсходованного на образование молекулы оксида.

$$V_{\text{Me}} = \frac{A_{\text{Me}}}{\rho_{\text{Me}}}\ ; \qquad V_{\text{Me}} = \frac{M_{\text{ок}}}{n\,\rho_{\text{ок}}}\ , \quad \text{тогда} \quad \frac{V_{\text{ок}}}{V_{\text{Me}}} = \frac{M_{\text{ок}}\rho_{\text{Me}}}{n\,\rho_{\text{ок}}A_{\text{Me}}} \qquad (2.4)$$

где V_{Me} и $V_{\text{ок}}$ – объем металла и оксида соответственно; A_{Me} – атомная масса металла; $M_{\text{ок}}$ – молекулярная масса оксида; ρ_{Me} и $\rho_{\text{ок}}$ – плотность

металла и оксида соответственно; n – число атомов металла в молекуле оксида.

Очевидно, что при $V_{ок}/V_{Me} > 1$ образуется сплошная пленка, при $V_{ок}/V_{Me} < 1$ пленка не получается сплошной.

Сплошность пленки является необходимым, но не достаточным условием для проявления защитных свойств. Когда $V_{ок}/V_{Me} >> 1$, может происходить возрастание внутренних напряжений, которое приводит к вспучиванию и отслаиванию пленки, что снижает её защитные свойства. Ориентировочно можно считать, что достаточно хорошими защитными свойствами обладают пленки на металлах, удовлетворяющие условию: $2{,}5 > V_{ок}/V_{Me} > 1$. Дополнительными условиями, обеспечивающими защитные свойства пленки, являются прочность, эластичность, хорошая адгезия к металлу и близкий с основным металлом коэффициент термического расширения.

2.2. МЕХАНИЗМ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ КОРРОЗИИ

Электрохимическими процессами называют процессы взаимного превращения химической и электрической форм энергии.

В основе учения об электрохимической коррозии лежит теория гальванического элемента, тесно связанная с понятием окислительно-восстановительной реакции (ОВР) и электродного потенциала.

Процессы окисления в электрохимии получили название анодных процессов, а ***электроды, на которых идут процессы окисления, называют анодами***. Примером анодного процесса является окисление цинка: $Zn^o \rightleftarrows Zn^{2+} + 2\bar{e}$.

Процессы восстановления в электрохимии получили название катодных процессов, а ***электроды, на которых идут процессы восстановления, называют катодами***. Примером катодного процесса является восстановление кислорода: $O_2 + 4H^+ + 4\bar{e} \rightleftarrows 2H_2O$.

Каждая из электродных реакций содержит окисленную [Ox] и восстановленную [Red] форму вещества. Ox - форма содержит элемент в более высокой степени окисления (Zn^{2+}, ${O_2}^o$), Red – в более низкой (Zn^o, H_2O).

При установлении равновесия $Red \rightleftarrows Ox^{n+} + n\bar{e}$ на границе раздела фаз (электрод-раствор) ионы Ox^{n+} переходят из одной фазы в другую. Каждая фаза при этом приобретает электрический заряд, и на границе их раздела создается двойной электрический слой, которому соответствует скачок потенциала φ, называемый равновесным *электродным потенциалом*.

Электродный потенциал φ зависит от природы веществ, их активности и температуры. Эта зависимость выражается уравнением Нернста:

$$\varphi = \varphi^o + \frac{RT}{nF} \ln \frac{a_{Ox}}{a_{Red}} \qquad (2.5)$$

В этом уравнении φ^o – стандартный электродный потенциал, В; R – универсальная газовая постоянная, 8,31 Дж/(моль·К); T – абсолютная температура, К; F – число Фарадея, 96500 Кл/моль; n – число электронов, участвующих в электродном процессе, a_{Ox} и a_{Red} – активности* соответственно окисленной и восстановленной форм вещества.

После подстановки значений постоянных величин и перевода натуральных логарифмов в десятичные уравнение Нернста примет вид:

$$\varphi = \varphi^o + \frac{0{,}059}{n} \lg \frac{a_{Ox}}{a_{Red}} \qquad (2.6)$$

Для газообразных веществ активности заменяют относительными парциальными давлениями соответствующих веществ:

$$\varphi = \varphi^o + \frac{0{,}059}{n} \lg \frac{\bar{p}_{Ox}}{\bar{p}_{Red}} \qquad (2.7)$$

Электродный потенциал является мерой окислительно-восстановительной способности веществ. Чем меньше потенциал, тем сильнее у *Red*-формы выражены восстановительные свойства, а чем он больше, тем более энергичным окислителем будет являться *Ox*-форма вещества. Абсолютные значения электродных потенциалов экспериментально определить невозможно. Поэтому для характеристики электрохимических процессов пользуются относительными значениями электродных потенциалов. Определяют их, измеряя разность потенциалов интересующего электрода и стандартного водородного электрода, потенциал которого условно принят равным нулю.

Электродные потенциалы для приведенных выше анодного и катодного процессов выразятся следующим образом:

$$\varphi_{Zn^{2+}/Zn} = \varphi^o + \frac{0{,}059}{2} \lg \frac{a_{Zn^{2+}}}{a_{Zn}} \quad ; \quad \varphi_{O_2/H_2O} = \varphi^o + \frac{0{,}059}{4} \lg \frac{\bar{P}_{O_2} a_{H^+}^4}{a_{H_2O}^2} \qquad (2.8)$$

Учитывая, что активности твердых веществ и воды при постоянной температуре – величины постоянные и приняты равными единице, а $lg_{a_{H^+}} = -pH$ после преобразований получим:

*Активность (*a*) – условная концентрация иона в реальном растворе. $a = \gamma \cdot c$, где γ – коэффициент активности, формально учитывающий все виды взаимодействия ионов в реальном растворе, приводящие к отклонению от свойств идеального раствора, *c* – молярная концентрация. Для разбавленных растворов активность можно заменить концентрацией (γ≈1).

$$\varphi_{Zn^{2+}/Zn} = \varphi^o + \frac{0{,}059}{2}\lg a_{Zn^{2+}};$$

$$\varphi_{O_2/H_2O} = \varphi^o + \frac{0{,}059}{4} lg\, \bar{p}_{O_2} - 0{,}059\, pH \quad (2.9)$$

Если активности и парциальные давления веществ, участвующих в реакции, равны единице, то логарифмический член уравнения Нернста обращается в нуль и φ = φ°. Следовательно, *стандартный электродный потенциал* φ° – это потенциал данного электродного процесса при активностях и парциальных давлениях всех участвующих в нем веществ, равных единице. Разность потенциалов E = φк – φа является движущей силой ОВР. Для реакции $2Zn + O_2 + 2H_2SO_4 = 2ZnSO_4 + 2H_2O$ при pH = 5, парциальном давлении кислорода $p_{O_2} = 0{,}21$ атм (в воздухе кислорода 21%) и активности ионов Zn^{2+} 0,01 моль/л, используя значения стандартных электродных потенциалов (*Прил.1*), находим:

φ_a = – 0,763 – 0,059/2 lg 0,01 = – 0,822 В;
$\varphi_к$ = +1,229 + 0,01475 lg 0,21– 0,059·5 = + 0,924 В;
$E = \varphi_к - \varphi_a$ = + 0,924 В – (– 0,822 В) = 1,746 В (самопроизвольный процесс).

При пространственном разделении процесса окисления от процесса восстановления и создании возможности перехода электронов от восстановителя к окислителю по проводнику (внешней цепи), во внешней цепи возникает направленное движение электронов – электрический ток.

Устройства, в которых химическая энергия окислительно-восстановительной реакции превращается в электрическую, называются *гальваническими элементами*.

Гальванический элемент состоит из двух электродов, погруженных в раствор электролитов, разделенных пористой перегородкой (диафрагмой) или соединенных с помощью трубки, заполненной токопроводящим раствором (солевой мостик). Электрод с меньшим значением потенциала является отрицательным электродом – *анодом*, на котором происходит процесс *окисления.* Электрод с бóльшим значением потенциала является положительным – *катодом*, на нем осуществляется *восстановление*.

Максимальная разность потенциалов электродов, которая может быть получена при работе гальванического элемента, называется электродвижущей силой (ЭДС) элемента. Разность потенциалов будет создана, если (из уравнения Нернста) потенциалы электродов будут неодинаковы при условии различных:
1) электродных реакций (рис. 2.2, *а*); 2) концентраций *Ox* и *Red*-форм (рис. 2.2, *б*) и 3) температур на электродах. Во втором случае гальванический элемент называется *концентрационным.*

Например, в гальваническом элементе Даниэля-Якоби (рис. 2.2, *а*) реализуется окислительно-восстановительная реакция $Zn + CuSO_4 = Cu + ZnSO_4$.

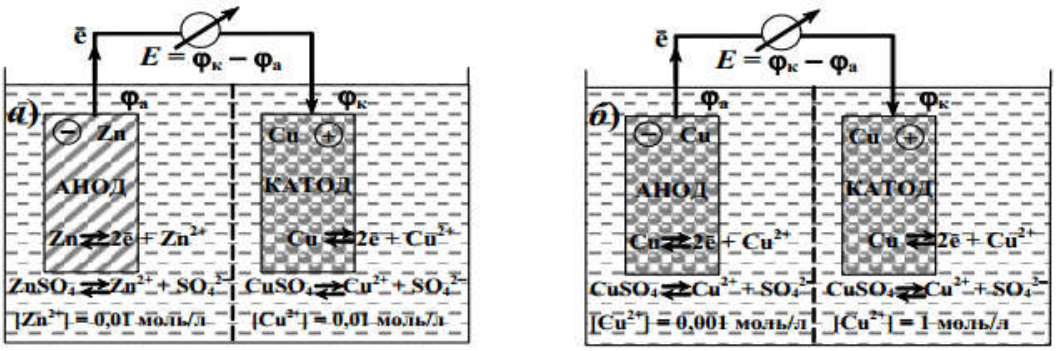


Рис. 2.2. Гальванические элементы: а – медно-цинковый; б – медный концентрационный

Схема гальванического элемента:
(–) Zn | Zn^{2+} ‖ Cu^{2+} | Cu (+).
Электродные процессы:
A(–): Zn = Zn^{2+} + 2ē;
$\varphi_а$ = – 0,763 + 0,059/2·lg 0,01 = – 0,822 В
K(+): Cu^{2+} + 2ē = Cu;
$\varphi_к$ = + 0,337 + 0,059/2·lg 0,01 = + 0,396 В
$E = \varphi_к - \varphi_а$ = + 0,396 – (– 0,822) = 1,218 В

Схема гальванического элемента:
(–) Cu | Cu^{2+} ‖ Cu^{2+} | Cu (+).
Электродные процессы:
A(–): Cu = Cu^{2+} + 2ē ;
$\varphi_а$ =+ 0,337 + 0,059/2·lg 0,001 = + 0,249 В
K(+): Cu^{2+} + 2ē = Cu;
$\varphi_к$ = + 0,337 + 0,059/2·lg 1 = + 0,337 В
$E = \varphi_к - \varphi_а$ = + 0,337 – 0,249 = 0,088 В

На разделенных в пространстве электродах, которыми являются цинковая и медная пластины, погруженных в растворы своих солей, протекают процессы окисления и восстановления соответственно. Анодом (–) является цинковая пластина, так как еѐ потенциал оказывается, по уравнению Нернста, меньше электродного потенциала медного электрода, являющегося катодом (+).

В концентрационном гальваническом элементе катодом и анодом являются электроды из одного металла, например, меди (рис. 2.2, *б*). Причиной возникновения разности потенциалов в такого рода гальваническом элементе является разная концентрация электролита, в который помещены его электроды. Схему гальванического элемента обычно принято записывать так, чтобы отрицательный электрод располагался слева, а положительный – справа, например: $(-)Zn\,|Zn^{2+}||Cu^{2+}|\,Cu\,(+)$. Вертикальная черта обозначает поверхность раздела между электродом и раствором, а две черты – границу раздела двух жидких фаз.

Механизм электрохимической коррозии аналогичен механизму работы гальванического элемента. Понятия «анод» и «катод» применительно к корродирующему металлу указывают лишь на преобладание того или иного процесса на данном участке металла и являются условными терминами. При работе коррозионного гальванического элемента (рис. 2.3) протекают следующие процессы:

Анодный процесс (коррозия) – переход металла (Me) в раствор в виде гидратированных ионов в результате его окисления, при этом в металле остается соответствующее число электронов: $Me \rightarrow Me^{n+} + n\bar{e}$

Катодный процесс – поглощение появившихся в металле избыточных электронов с помощью «деполяризаторов» (D) – атомов, молекул, ионов, подвергающихся восстановлению на всей поверхности металла или ее отдельных участках: $D + \bar{e} \rightarrow D^-$. Роль деполяризаторов чаще всего

выполняют растворенный в коррозионной среде кислород O_2 или ионы гидроксония H_3O^+. В первом случае говорят, что коррозия протекает с *кислородной деполяризацией*, во втором, соответственно, с *водородной деполяризацией.*

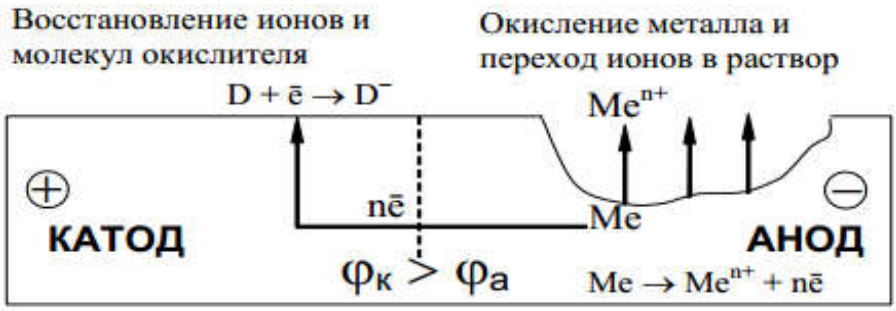


Рис. 2.3. Схема работы коррозионного гальванического элемента

Примерами анодных реакций, сопровождающихся переходом металла в раствор, могут быть процессы окисления любых металлов, чей стандартный электродный потенциал меньше потенциала катодного процесса (*Прил. 1*). Например: $Fe = Fe^{2+} + 2\bar{e}$; $\varphi_а = -0{,}440$ В.

Примерами катодных реакций в зависимости от кислотности среды и наличия в ней кислорода могут являться:

восстановление водорода, $\varphi_к = -0{,}059\ pH - 0{,}0295\ \lg \bar{p}$

(при 25°С и парциальном давлении водорода в атмосфере $5 \cdot 10^{-5}$ кПа):

$2H_3O + 2\bar{e} = H_2 + 2H_2O$ (pH=0) $\varphi_к = +$ **0,186** В в кислой;
$2H_2O + 2\bar{e} = H_2 + 2OH^-$ (pH=7) $\varphi_к = -$ **0,227** В в нейтральной;
$2H_2O + 2\bar{e} = H_2 + 2OH^-$ (pH=14) $\varphi_к = -$ **0,826** В в щелочной средах.

восстановление кислорода, $\varphi_к = 1{,}229 - 0{,}059\ pH + 0{,}01475\ \lg \bar{p}_{O_2}$

(при 25°С и парциальном давлении кислорода в атмосфере 21 кПа):

$O_2 + 4H_3O^+ + 4\bar{e} = 6H_2O$ (pH=0) $\varphi_к = +$ **1,219** В в кислой;
$O_2 + 2H_2O + 4\bar{e} = 4OH^-$ (pH=7) $\varphi_к = +$ **0,806** В в нейтральной;
$O_2 + 2H_2O + 4\bar{e} = 4OH^-$ (pH=14) $\varphi_к = +$ **0,393** В в щелочной средах.

Снижение pH коррозионной среды увеличивает значение электродного потенциала катодных процессов, т.е. усиливает окислительную способность кислорода и водорода, увеличивая скорость коррозии и расширяя ряд металлов, способных разрушаться в данных условиях. Например, в щелочной среде кислород может окислять только те металлы, потенциал которых меньше +0,393 В, в нейтральном водном растворе кислород окисляет металлы, потенциал которых меньше +0,806 В, а в кислой среде способен окислять металлы с потенциалом меньшим +1,219 В. В отсутствие кислорода вода и ионы H_3O^+ могут окислять металлы с потенциалом менее – 0,640; – 0,227 и + 0,186 В соответственно.

Следовательно, вода, содержащая растворенный кислород, значительно опаснее в коррозионном отношении.

Вторичные реакции при коррозии. Продукты анодных процессов (ионы металла) могут далее вступать в реакцию с продуктами катодных реакций (например, с ионами OH^-) с образованием малорастворимых гидроксидов металлов: $Fe^{2+} + 2OH^- = Fe(OH)_2$.

Гидроксид железа (II) окисляется кислородом воздуха до нестабильного гидроксида железа (III): $Fe(OH)_2 + O_2 + 2H_2O = 4Fe(OH)_3$, который разлагается, образуя Fe2O3·H2O красно-коричневого цвета. Если кислорода недостаточно для полного окисления $Fe(OH)_2$, то образуется магнетит Fe_3O_4:
$6Fe(OH)_2 + O_2 = 6H_2O + 2Fe_3O_4$. Образование гидратированных оксидов железа на поверхности стальных изделий называется *ржавлением*, а продукты коррозии – ржавчиной. Таким образом, *ржавчина* – это продукт вторичных реакций электрохимической коррозии железа и его сплавов, который состоит из гидратированных оксидов железа.

Самый глубокий слой ржавчины соответствует FeO , затем следуют черный магнетит Fe_3O_4 ($Fe_2O_3 \cdot FeO$), гидратированный магнетит $Fe_3O_4 \cdot H_2O$ и гидратированный оксид $Fe_2O_3 \cdot H_2O$ – наружный слой, что объясняется затрудненным доступом кислорода к более глубоким слоям продуктов коррозии.

3. КОРРОЗИЯ МЕТАЛЛОВ В ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДАХ

Металлоконструкции в зависимости от своего назначения работают в природных или промышленных средах.

Характер технологической среды оказывает значительное влияние на закономерности коррозионных процессов и требует принятия различных решений для осуществления основной инженерной задачи - защите металлов от коррозии.

В соответствие с принятой классификацией в этой части книги будут рассмотрены основные закономерности протекания коррозионных процессов в природных условиях. Это атмосферная, почвенная и морская коррозия.

Технологические среды химических производств отличаются большим многообразием, различным сочетанием коррозионно-активных компонентов, и в каждом конкретном случае требуют своего решения. Поэтому в этой части книги будут рассмотрены общие вопросы влияние конструктивных факторов на развитие коррозионных разрушений машин и аппаратов и некоторые виды газовой коррозии, которые приводят к специфическим деструктивным изменениям металлов и сплавов.

3.1.КОРРОЗИЯ МЕТАЛЛОВ В ПРИРОДНЫХ СРЕДАХ

Большинство металлоконструкций эксплуатируется в природных, естественных средах. Значительное количество стальных сооружений эксплуатируется в атмосферных условиях. Магистральные и промысловые трубопроводы, водоводы, обсадные колонны скважин нефтяных и газовых месторождений работают под землей. Общая масса стали, находящаяся под землей, превышает 200 млн тонн, а поверхность стальных сооружений, подвергающихся почвенной коррозии, составляет более полутора миллиардов квадратных метров.

Металлические конструкции портов, причалов, судов находятся в постоянном контакте с водой и подвержены морской коррозии.

Все виды коррозионных процессов в природных условиях протекают по электрохимическому механизму. Однако каждая природная среда обладает своими особенностями.

3.1.1.АТМОСФЕРНАЯ КОРРОЗИЯ МЕТАЛЛОВ

Атмосферная коррозия - это коррозия сооружений и оборудования, эксплуатирующихся в нормальной земной атмосфере.

Скорость коррозии и вид коррозионного разрушения зависят от природы металла, влажности, загрязненности атмосферы (ГОСТ 16350-80). В среднем скорость коррозии металлов в атмосфере ниже, чем в почве и морской воде.

Основным стимулирующим фактором атмосферной коррозии является вода. При относительной влажности во до 60% следы влаги на поверхности металла отсутствуют. В этом случае коррозия протекает по химическому механизму. Образующиеся на поверхности оксидные пленки обладают защитными свойствами и тормозят развитие коррозионных разрушений (рис. 3.1).

При относительной влажности воздуха, равной 60-70%, начинается конденсация влаги и на поверхности металла появляется адсорбционная пленка воды. Относительная влажность, при которой начинается конденсация влаги на поверхности металла называется критической влажностью. Она зависит от состояния металла и от степени загрязнения воздуха.

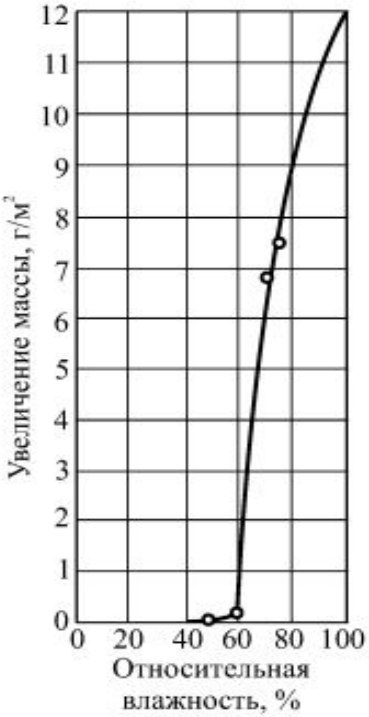


Рис. 3.1. Коррозия железа в воздухе, содержащем 0,01 % (об.) SO_2.

Выдержка 55 дней

При относительной влажности, близкой к 100%, или при непосредственном увлажнении металла (дождь туман), на поверхности происходит образование видимых фазовых слоев воды.

Указанные три типа состояний значительно отличаются по механизму протекания процесса коррозии.

В области сухой коррозии, как указывалось выше, реализуется химический механизм процесса и скорость разрушения металлов невелика. Рост оксидной пленки происходит в первые секунды и минуты. После двух-трех часов дальнейшее утолщение пленки прекращается. Предельная толщина пленок на железе - 30-40 Å, на нержавеющих сталях - 10-20 Å.

Железо и сталь в обычных условиях подвергаются общей равномерной коррозии. Характер протекания атмосферной коррозии существенно зависит от конструктивных особенностей изделия. Наличие узких щелей и зазоров, в которых возможны капиллярная конденсация и застой влаги, усугубляют атмосферную коррозию и могут привести к образованию коррозионных язв (рис. 3.2).

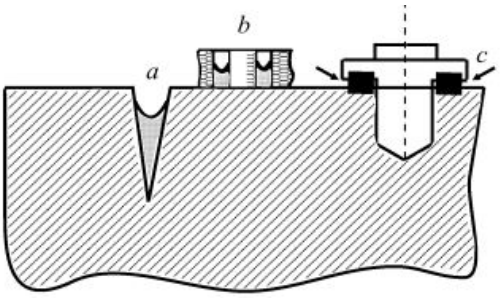


Рис. 3.2. Влияние конструктивных особенностей изделий на центры капиллярной конденсации влаги и усиление атмосферной коррозии:
a – щель или зазор в деталях конструкции;
b – поры в защитном покрытии или в оксидной пленке;
c – неплотности в резьбовых и винтовых соединениях

Загрязнение атмосферы газами, пылью резко ускоряет коррозию. Это явление наблюдают в промышленных центрах, особенно в присутствии в воздухе $SO_2, NH_3, H_2S, Cl_2, HCl$.

Обнаружено резко стимулирующее коррозию влияние низких концентраций SO_2. Так, присутствие в атмосфере SO_2 в концентрациях 15 – 35 мкг/м³ увеличивает скорость коррозии в десятки и сотни раз. В это же время высокие концентрации SO_2 увеличивают скорость коррозионных разрушений только в 5-7 раз.

В работах Ю.Н. Михайловского предложена физико-механическая модель атмосферной коррозии, которая позволяет связать интенсивность коррозионных разрушений с параметрами окружающей среды. Это служит основой для прогнозирования коррозионного поведения металлов и разработки способов их защиты.

Стойкость металлов к атмосферной коррозии зависит от их химической природы и состояния поверхности. Ниже приведены приближенные данные по стойкости некоторых металлов в городской атмосфере (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Стойкость металлов в атмосфере

Металл	Pb	Al	Sn	Cu	Ni	Zn	Fe
Скорость коррозии, мкм/год	4	8	12	12	32	50	200

Для защиты от атмосферной коррозии используют различные органические, неорганические и металлические покрытия. Эффективно легирование стали небольшими количествами меди, никеля, фосфора и хрома.

3.1.2. ПОЧВЕННАЯ КОРРОЗИЯ МЕТАЛЛОВ

Различные трубопроводы, силовые кабели и кабели связи, опоры, емкости и другие металлические конструкции эксплуатируются в подземных условиях.

Почва и грунт представляют собой сложную природную среду, особенности которой надо учитывать при рассмотрении протекающих в ней процессов коррозии.

Вода в грунте присутствует в виде связанной капиллярной и гравитационной. Связанная вода, входящая в состав гидратированных химических соединений, не оказывает влияния на коррозию.

Высота подъема капиллярной влаги зависит от эффективного радиуса пор грунта. Уровень грунтовых вод и пористость грунта определяют влажность, которая влияет на скорость коррозии.

Гравитационная влага перемещается по грунту под действием силы тяжести и также влияет на режим влажности почвы. Разные почвы по-разному удерживают влагу. Тяжелые, глинистые почвы удерживают влагу длительное время, песчаные почвы - более проницаемы.

С увеличением влажности почвы ее коррозионная активность повышается до тех пор, пока не достигнет некоторого критического уровня. В дальнейшем с увеличением влажности ее активность падает. Это связывают уменьшением доступа необходимого кислорода, для осуществления катодной реакции.

Для каждого вида почвы существует свое значение критической влажности, при которой коррозионные потери достигают максимума. Для глинистых почв это значение лежит между 12 и 25 %, для песчаных - между 10 и 20 %.

При малой увлажненности почвы велики омические потери, что затрудняет протекание электрохимических процессов. Значение pH для большинства почв находится в границах pH = 6,0-7,5. Однако, встречаются также щелочные суглинки и солончаки, имеющие значение pH = 7,5-9,5, и кислые, гумусовые и болотные почвы с pH = 3,0-6,0. Такие почвы отличаются высокой агрессивностью.

Минерализация почвы может меняться в широких пределах – от 10 мг/л до 300 мг/л, что тоже сказывается на скорости коррозии.

Минералогический и гранулометрический состав грунтов, так же, как и влажность влияет на омическое сопротивление. Так, в сухом песчано-глинистом грунте Удельное сопротивление почвы составляет 240000 Ом·см, а во влажном песчано-глинистом грунте – 900 Ом·см. Этот

показатель такие влияет на агрессивность почвы. Ниже приведены данные, характеризующие взаимосвязь между электросопротивлением и агрессивностью почвы (табл. 3.2).

Таблица 3.2

Зависимость коррозионной агрессивности грунта от удельного сопротивления почвы

Удельное сопротивление, Ом·см	<500	500-1000	1000-2000	2000-10000	>10000
Агрессивность грунта	Особо высокая	Высокая	Повышенная	Средняя	Низкая

Большое значение имеет воздухопроницаемость почв. Затруднение доступа кислорода снижает скорость коррозии. По этой причине песчаные почвы часто более агрессивны, чем глинистые. Если трубопровод пролегает последовательно в глинистых и песчаных почвах, т.е. в условиях неравномерной аэрации, то возникают микрогальванические коррозионные зоны: на глинистом участке - анодная, а на песчаном - катодная (рис. 3.3). Разрушение металла протекает на тех участках, к которым затруднен доступ кислорода. Анодные и катодные участки могут быть значительно удалены друг от друга. Расстояние между ними может составлять несколько сотен метров.

В большинстве почв процесс коррозии протекает с катодным

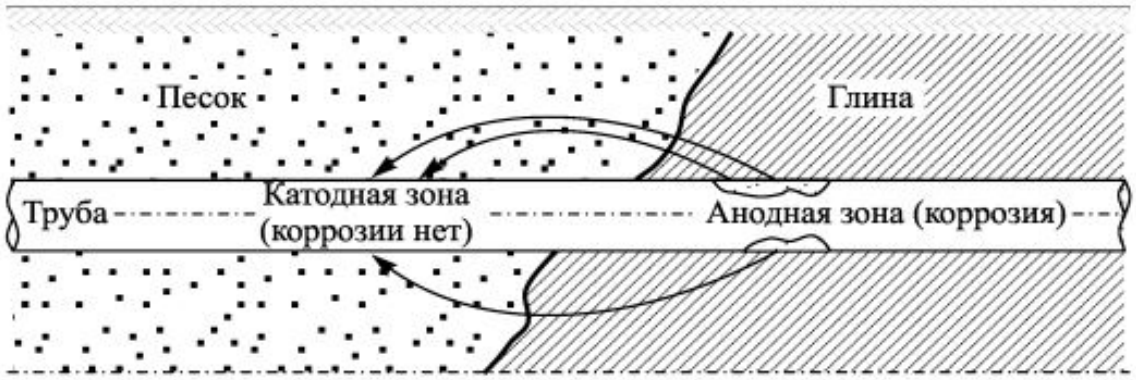


Рис. 3.3. Схема коррозии подземного трубопровода в условиях различной аэрации почв

торможением из-за трудности транспорта кислорода (рис. 3.4, *а*). В рыхлых, хорошо аэрируемых почвах наблюдается анодное торможение (рис. 3.4, *б*). При возникновении коррозионных пар, в которых анодные и катодные участки значительно удалены друг от друга, процесс характеризуется омическим торможением (рис. 3.4, *в*).

Помимо равномерной коррозии подземные металлические сооружения подвержены питтингу и коррозионному растрескиванию (КР). Питтинг возникает чаще всего на нижней части трубопроводов, где

имеется постоянный контакт с грунтом. КР обнаруживают в катодно поляризованных трубопроводах в местах нарушения защитных покрытий.

Для защиты изделий от подземной коррозии используют электрохимические методы, а также нанесение изолирующих (битумных,

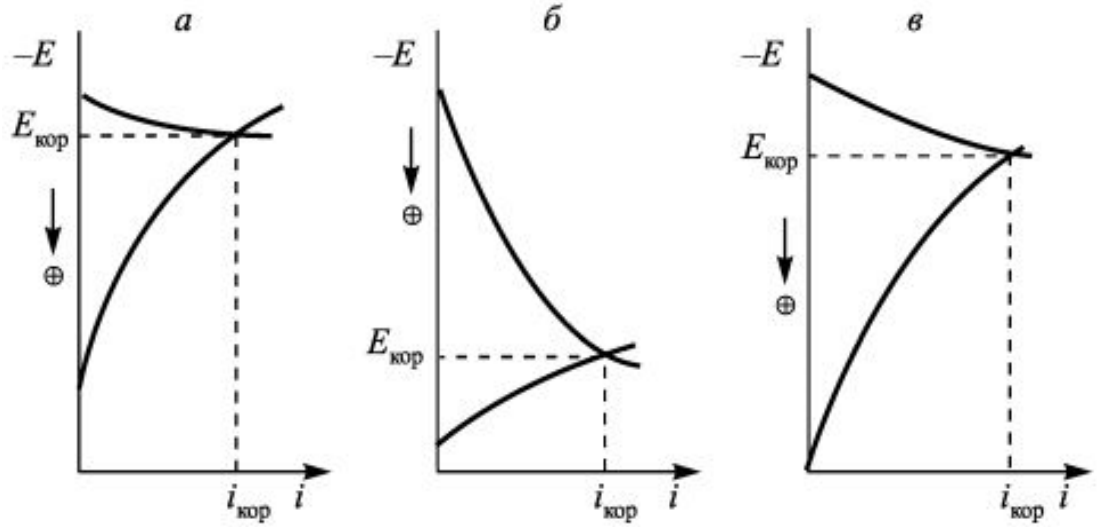


Рис. 3.5. Случаи контроля коррозионного процесса для различных условий почвенной коррозии:

а - коррозия в большинстве почв с превалирующим катодным контролем; б - коррозия в рыхлых, сухих почвах (анодный контроль); в - коррозия при большой протяженности (превалирующий омический контроль)

полимерных) многослойных покрытий.

Блуждающие токи являются причиной серьезных коррозионных разрушений подземных коммуникаций и сооружений в промышленной зоне. Блуждающие постоянные токи появляются вследствие утечки в грунт постоянного тока, потребляемого наземным и подземным рельсовым транспортом (метро, трамвай, электрифицированная железная дорога), электросварочными агрегатами. Участки, где блуждающие токи входят из земли в металлическую конструкцию, становятся катодами, а там, где ток стекает с металла в почву - анодами. Интенсивность коррозионных повреждений находится в прямой зависимости от величины блуждающих токов и подчиняется закону Фарадея. Протекание тока величиной в 1 А в течение года соответствует растворению около 9 кг железа. В некоторых неблагоприятных случаях были зарегистрированы блуждающие токи величиной до 200-500 А. Отсюда видно насколько интенсивными могут быть повреждения от блуждающих токов. Если анодная область равномерно распределена по большой поверхности, коррозионные потери могут и не вызывать аварийных разрушений, но в местах нарушения неметаллического защитного покрытия коррозионные разрушения происходят быстро.

Для защиты трубопроводов от действия блуждающих токов используют дренаж - соединение металлической шиной источника блуждающих токов, например, рельсов, с их приемником, например,

трубопроводом. Если дренаж установить невозможно, то в направлении рельса закапывают специальный анод из чугуна, который соединяют с анодной областью трубопровода медным проводником. Тогда блуждающий ток вызывает коррозию только этого специального анода. Если дополнительного анода недостаточно, то в цепь между анодом и трубой включают источник постоянного тока противоположного направления. Для уменьшения разрушающего действия блуждающих токов используют также изолирующие прокладки в местах стыка трубопровода.

Подземная коррозия может интенсифицироваться микроорганизмами. В почве обитают два вида микроорганизмов: аэробные, жизнедеятельность которых протекает только при наличии кислорода, и анаэробные бактерии, развивающиеся п отсутствии кислорода. Коррозия металлов, вызванная или усиленная воздействием микроорганизмов, носит название биологической или биохимической.

Аэробные бактерии могут быть двух видов: одни окисляют серу, другие - осаждают железо. Первый вид бактерий лучше всего развивается в кислой среде (pH = 3÷6). Они окисляют серу до серной кислоты. При этом на отдельных участках концентрация серной кислоты может доходить до 10%. Такое подкисление среды вызывает резкое увеличение скорости коррозии.

Аэробные бактерии, перерабатывающие железо, развиваются в интервале pH = 4 ÷10. Сущность их деятельности заключается в том, что они поглощают железо в ионном состоянии, а выделяют его в виде нерастворимых соединений. Неравномерное отложение этих соединений приводит к увеличению гетерогенности поверхности, что усиливает коррозию.

Анаэробные бактерии в основном восстанавливают серу из сульфатов, находящихся в почве. Этот тип бактерий развивается при pH 5,5 ÷ 8,0. В результате их жизнедеятельности ионы SO_4^{2-} восстанавливаются до S^{2-} с выделением O_2. Последний начинает принимать активное участие в катодном процессе. Присутствие в коррозионной среде сульфидов и сероводорода приводит к образованию на поверхности изделия рыхлого слоя сульфида железа. Коррозия имеет питтинговый характер.

3.1.3. МОРСКАЯ КОРРОЗИЯ МЕТАЛЛОВ

Портовые сооружения, причалы, суда, оборудование морских нефтепроводов подвержены воздействию морской коррозии.

Морская вода представляет собой раствор разнообразных солей, главным образом хлоридов, сульфатов и карбонатов натрия, магния, калия, кальция и т.д. Она является электролитом, ее электропроводность достаточно высокая и составляет (2,5-3,0) $\cdot 10^{-2}$ $Ом^{-1} \cdot см^{-1}$, имеет

нейтральную или слабощелочную реакцию (pH = 7,2 ÷ 8,6). Присутствие в морской воде ионов хлора, те ионов-активаторов, делает эту среду высоко коррозионно-активной.

Соленость морской воды определяют в промиллях ($‰_0$). Промиллей называется количество твердых веществ в граммах, растворенное в 1000 г морской воды, при условии, что все галогены заменены эквивалентным количеством хлора, все карбонаты переведены в оксиды, органические вещества сожжены. В этом случае $1‰_0$= 0,1 мас. %. Средняя соленость воды в океане 3-3,5 $‰_0$. Но она значительно колеблется в различных водных бассейнах.

Так, содержание солей в %: в заливе Кара-Богаз - 16; в Красном море - 4.1; в Средиземном море – 3,9; в Атлантическом океане - 3,5; в Черном море - 1,7: в Финском заливе - 0,4; в речной воде – 0,03.

В морской воде содержится большое количество микроорганизмов, способствующих ускорению коррозии и обрастанию соприкасающихся с водой металлоконструкций.

Коррозия в морской воде протекает по электрохимическому механизму исключительно с катодным контролем. Присутствие ионов-активаторов (Cl^-) препятствует образованию пассивных пленок на поверхности металлов. Высокая электропроводность исключает проявление омического торможения.

Зависимость скорости коррозии железа от концентрации NaCl в аэрированном водном растворе проходит через максимум при содержании NaCl ≈ 3%. Уменьшение скорости коррозии объясняется снижением растворимости кислорода в воде с ростом концентрации NaCl.

Увеличение скорости потока ведет к усилению коррозии вследствие улучшения аэрации поверхности металла. Кроме того, высокие скорости потока способствуют эрозионному разрушению металла.

Повышенное содержание кислорода в поверхностных слоях воды вызывает усиленную коррозию в области ватерлинии судов, на участках гидросооружений, находящихся близко к поверхности или периодически омываемых водой (рис. 3.6).

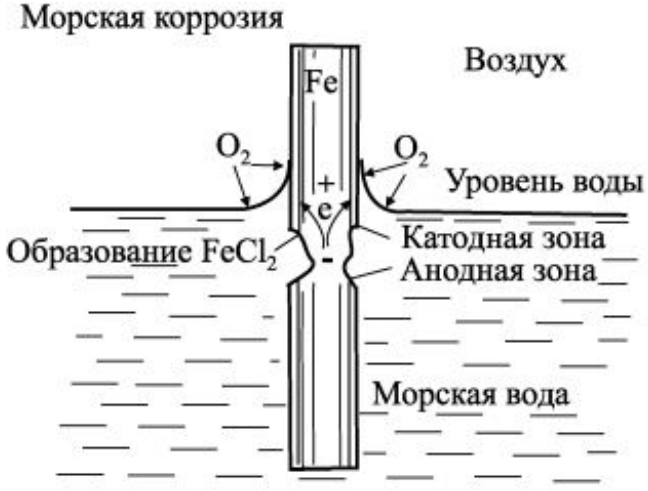


Рис. 3.6. Схема коррозии железа, погруженного в морскую воду

На погруженных в воду конструкциях закрепляются или развиваются многие растительные и животные организмы. Это явление называется обрастанием. Микроорганизмы ускоряют разрушение противокоррозионных покрытий. Появляются локальные

очаги оголенной металлической поверхности, которые провоцируют интенсивное разрушение металла.

Основным видом защиты от морской коррозии являются противокоррозионные и противообрастающие лакокрасочные и металлизационные покрытия и электрохимическая защита.

Среди лакокрасочных покрытий наиболее эффективны толстослойные покрытия на эпоксидной основе с ограниченным содержанием растворителя или без растворителя.

В защитные композиции добавляют вещества, обладающие противообрастающим действием. Они носят название биоцидов. Наиболее часто применяют оксиды меди (l) и (II). Они, вымываясь из покрытия, образуют в морской воде труднорастворимые комплексы. Кроме того, у соединений меди отсутствует кумулятивный эффект для морских организмов.

Для защиты судовых конструкций чаще всего используют алюминий с легирующими добавками, например, цинком или лантаном. Алюминиевые покрытия в сочетании лакокрасочными покрытиями обладают высокой стойкостью в морской воде, имеют повышенную стойкость к эрозии.

4. УЧЕТ ТРЕБОВАНИИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИИ

Для обеспечения требуемой долговечности конструкций стадия проектирования является определяющей, так как уже при проектировании необходимо учесть особенности работы металлических конструкций в агрессивных эксплуатационных условиях, связанных с характером и интенсивностью коррозионных разрушений элементов. Игнорирование этих особенностей приводит к снижению долговечности конструкций или к росту эксплуатационных затрат, т. е. к снижению эффективности капитальных вложений.

4.1. ВЫБОР МАТЕРИАЛА

Выбор материала — один из методов снижения коррозионного износа. Хотя в большинстве эксплуатационных сред металлические конструкции применяются в защищенном виде, было бы неправильно делать вывод, что свойства конструкционного материала в этом случае несущественны. Во-первых, надежность индустриальных средств защиты металлических конструкций от коррозии невысока, а в ряде случаев защитные покрытия не возобновляются в процессе эксплуатации. Во-вторых, как показывают обследования, защитные покрытия ведут себя по-разному в зависимости от антикоррозионных свойств материала: чем менее коррозионностоек материал, тем быстрее разрушаются защитные

покрытия, и, в-третьих, характер коррозионных разрушений элементов, от которого зависит изменение несущей способности при эксплуатации, также зависит от свойств конструкционного материала. Следовательно, от правильного выбора материала зависит срок службы конструкции. Сложность этой технико-экономической задачи объясняется тем, что коррозионная стойкость материала без учета условий эксплуатации не может быть охарактеризована каким-либо показателем, как, например, механические свойства металла. Поэтому выбор материала должен базироваться на результатах экспериментальных исследований. Такие исследования проводятся в лаборатории долговечности металлических конструкций МИСИ им. В. В. Куйбышева, ЦНИИ проектсталь конструкции, ЦНИИ и других организациях. В табл. 4.1 показаны скорости коррозии строительных сталей, полученные экспериментально в натурных условиях объектов цветной металлургии. По степени агрессивности среды объекты разделены на четыре группы, определяемые скоростью коррозии конструкций.

Таблица 4.1

Марка стали Ст3	Скорость коррозии, мм/год при группе агрессивности среды			
	I	II	III	IV
	Конструкции			
	⩾*0,3*	0,1 ⩽V <0.3	0,05<V <0,1	⩽0,05
	Образец			
Ст3	**0,2-0,4**	**0,05-0,1**	**0,01-0,06**	**0,001-0,005**
15Г2СФгк	**0,15-0,35**	**0,05-0,14**	**0,01-0,05**	**0,001-0,003**
15Г2СФто	**0,15-0,35**	**0,04-0,13**	**0,01-0,04**	**0,001-0,003**
15ХГ2СМФРто	**0,2-0,3**	**0,04-0,11**	**0,01-0,03**	**0,002-0,004**
14ГСМФР	**0,3—0,5**	**0,006-0,15**	**0,02-0,06**	**0,002-0,005**
10Г2С1	**0,2-0,4**	**0,05-0,15**	**0,02-0, as**	**0,002-0,005**
18Г2ЛФпс	**0,2-0,4**	**0,05-0,1**	**0,01-0,03**	**0,001 -0,003**
15Г2АФД11С	**0,15-0,25**	**0,03-0,08**	**0,01-0,03**	**0,001-0,002**
09Г2	**0,2-0,5**	**0,06-0,15**	**0,02-0,06**	**0,002-0,005**
18Г	**0,3—0,5**	**0,06-0,15**	**0,02-0,06**	**0,002-0,005**
10хндп	**0,1-0,2**	**0,02-0,05**	**0,01-0,02**	**0,001-0,002**

Как видно, скорость коррозии стали зависит в первую очередь от степени агрессивности среды: при увеличении степени агрессивности на одну ступень скорость коррозии изменяется почти на порядок. Все строительные стали можно разделить на три группы по коррозионной стойкости: 1) марганцовистые стали и сталь 14ГСМФР; 2) все стали, кроме входящих в 1-ю и 3-ю группы; 3) медистые и атмосферостойкие стали. Однако если степень агрессивности среды изменяет скорость коррозии на порядок, то влияние химического состава меньше и может достигать 1,5—2 раза.

Стали, входящие в 1-ю группу, 09Г2, МГ2, 14ГСМФР имеют пониженную коррозионную стойкость и не должны применяться в сильно- и среднеагрессивных средах.

Стали 18Гпс, 09Г2С, 10Г2С1, 15Г2СФ, 15ХГ2СМФР, 18Г2АФ по коррозионной стойкости аналогичны углеродистой стали.

Атмосферостойкие низколегированные строительные стали не являются нержавеющим материалом, как, например, нержавеющие стали. Концентрация легирующих элементов в этих сталях недостаточна для полного пассивирования их поверхности. В первый период взаимодействия с атмосферой поведение этих сталей мало чем отличается от поведения углеродистых сталей. Однако после более длительной эксплуатации коррозионные потери атмосферостойких сталей меньше, чем у углеродистых, причем эта разница с течением времени увеличивается. Это объясняется влиянием легирующих элементов (фосфор, никель, медь и др.) на сплошность и другие свойства пленки продуктов коррозии, образующейся через определенный промежуток времени на поверхности элементов. Состав и структура пленки и, следовательно, ее защитные свойства определяются условиями эксплуатации. Длительность формирования защитного слоя в открытой атмосфере— 1,5— З года, при наличии сернистого газа защитный слой формируется быстрее.

Стали марок 10ХСНД, 15ХСНД, ШХНДП имеют повышенную коррозионную стойкость и в слабоагрессивных открытых атмосферах могут применяться без специальных защитных мероприятий. В сильно- и среднеагрессивных средах эти стали близки по стойкости углеродистой стали, а в закрытых атмосферах цехов отсутствуют условия для образования на поверхности плотных защитных слоев продуктов коррозии.

Медистые стали имеют повышенную коррозионную стойкость в атмосфере, в условиях цеха (в закрытом помещении) влияние меди на коррозионную стойкость практически не сказывается.

Способ выплавки сталей при одинаковом химическом составе, а также колебания химического состава в пределах одной марки не оказывают влияния на потери от коррозии в одной и той же среде.

Напряженно-деформированное состояние в элементах конструкций, пластическая деформация, механическая и термическая обработка по разным режимам не оказывают заметного влияния на сопротивление сталей атмосферной коррозии. Однако эти факторы могут существенно повлиять на характер коррозионных разрушений, от чего зависит изменение несущей способности прокорродированных эле ментов.

При оценке коррозионного поведения низколегированных и термообработанных сталей важным показателем, с точки зрения несущей способности элементов конструкций, является глубина проникания

коррозии, мм/год, представляющая собой среднюю глубину коррозионных язв. Легирующие элементы более эффективны в снижении коррозионных потерь, нежели в уменьшении глубины коррозионных поражений. Поэтому в средах, которые способствуют сильному питтингообразованию, эффект применения низколегированных сталей падает.

Кинетика коррозионного износа сталей в первом приближении может быть описана экспоненциальным уравнением вида:

$$h^{c}_{л}(t) = at^{1/n}, \qquad (4.1)$$

где $h^{c}_{л}(t)$ — средняя потеря толщины стального листа в момент времени t; а— эмпирический коэффициент, зависящий от марки стали и агрессивности эксплуатационной среды, для малоугрелористой стали в условиях групп цехов по табл. 4.1 а можно принять: для I группы цехов — 0,42; для II группы — 0,30; для III группы — 0,18; для 1V группы — 0,08; n — эмпирический коэффициент, зависящий от характера коррозии; для всех исследованных сред n=3.

Обследования показали, что местами усиленного коррозионного износа оказываются сварные соединения.

Следовательно, при проектировании соединений из сталей повышенной и высокой прочности выбор типов соединений, сварочных материалов и режимов сварки должен определяться, помимо других факторов, коррозионной стойкостью соединений, которая должна быть не ниже коррозионной стойкости соединяемых элементов.

В некоторых случаях в агрессивных средах целесообразно применять конструкции из алюминиевых сплавов. Однако необходимо иметь в виду, что высокая коррозионная стойкость алюминиевых сплавов не является их абсолютным свойством, а зависит от химического состава и состояния сплава, состава агрессивной среды, напряжённо-деформированного состояния элемента, контактов с другими материалами, конструктивных особенностей, положения в пространстве и т. д.

Коррозия алюминиевых сплавов в атмосферных условиях обычно язвенная или питтинговая, причем глубина поражений может быть значительной при общих небольших потерях массы. Питтинги и язвы располагаются по поверхности неравномерно, скорость их роста со временем уменьшается. Некоторые сплавы подвержены коррозионному растрескиванию, а прессованные полуфабрикаты — расслаивающей коррозии. Поэтому при использовании алюминиевых сплавов в конструкциях какого-либо объекта необходимо тщательно подходить к вопросам выбора сплавов и методов их защиты исходя из результатов исследования коррозионной стойкости сплава в эксплуатационных условиях данного или аналогичного предприятия.

Чтобы получить необходимую информацию для выбора алюминиевого сплава и прогнозирования коррозионного износа в

процессе эксплуатации по специально разработанной комплексной методике с учетом напряженного состояния и конструктивной формы, были проведены испытания группы алюминиевых сплавов в атмосфере действующих объектов предприятий цветной металлургии и в камеральных условиях.

Коррозионную стойкость оценивали по потерям массы, изменению механических свойств, средней глубине и плотности расположения питтингов. Среднюю глубину и плотность расположения питтингов определяли, как среднестатистическую.

Анализ результатов свидетельствует, что количественные показатели коррозии: потеря массы, изменение механических свойств и глубина проникания питтинга неодинаково характеризуют поведение сплава. Для сталей коррозионные потери массы, прочности и толщины в большинстве случаев хорошо согласуются между собой, и поэтому по каждому из этих параметров можно судить о коррозионной стойкости стали. Так как коррозия алюминиевых сплавов имеет главным образом локальный характер, при оценке их коррозионной стойкости небезразлично, что принимать за показатель коррозии. Результаты испытаний показали, что коррозионную стойкость алюминиевых сплавов для строительных конструкций наиболее правильно оценивать по потере прочности и средней глубине питтинга, определенной непосредственным замером. Если сравнить скорость коррозии стали и алюминиевых сплавов. определенную по потере массы, то алюминиевые сплавы в 10—40 раз более стойки, в то время как средняя глубина питтинга и условная глубина коррозии, определенная по потере временного сопротивления, у стали и алюминиевых сплавов часто одинакова. В случае контакта сплава с другими металлами, имеющими более положительный потенциал, скорость его коррозии может быть выше скорости коррозии стали. Покрытие медеплавильного цеха, выполненное из сплава АМцМ в виде волнистого листа толщиной 0,8 мм без защиты, разрушилось через два года эксплуатации, в то время как срок службы стальной кровли в этих же условиях 5—6 лет. Причиной такого разрушения было присутствие меди в составе пыли цеха, что привело к контактной коррозии [25].

Коррозионная стойкость различных алюминиевых сплавов, определенная по потере массы, в одних и тех же условиях практически одинакова. Однако склонность к локальной коррозии различна. Из исследованных сплавов наименее склонными к локальной коррозии оказались АМцМ, АД33Т, АД33Т1, АД35Т и в некоторых средах 1915 и АМг6.

Выявлено увеличение средней глубины коррозионных поражений алюминиевых сплавов в зависимости от уровня нагруженности

$(|\sigma|/\sigma_{0,2})$. В пределах упругости эта зависимость удовлетворительно описывается уравнением прямой линии:

$$h_\sigma = h_0\left[1 + \kappa_\sigma(|\sigma|/\sigma_{0,2})\right], \qquad (4.2)$$

где и h_σ — средние глубины коррозионных поражений при напряжениях σ и σ_0=0; κ_σ — эмпирический коэффициент, зависящий от марки сплава и степени агрессивности среды. Для сильноагрессивной среды κ_σ, для сплава АМг6 равен 1,25, для сплава 1915Т —0,46, для сплава АД31Т-0,4; $|\sigma|$ — абсолютное значение действующих напряжений; $\sigma_{0,2}$ — условный предел текучести.

Кинетика роста средней глубины питтингов на алюминиевых сплавах описывается экспоненциальным уравнением:

$$h^a(t) = at^{l/n}, \qquad (4.3)$$

где $h^a(t)$ — средняя глубина питтинга в момент времени t; a — эмпирический коэффициент, зависящий от марки сплава и напряженного состояния и равный 0,05—0,07; n — эмпирический коэффициент, зависящий от степени агрессивности среды; для сильноагрессивной среды n =3,1.

Для исследования коррозионной стойкости сварных соединений элементов из алюминиевых сплавов были проведены специальные исследования на сплаве АМг6М в натурных условиях и во влажной камере [23].

Сварное соединение термически неупрочняемого сплава АМг6М состоит из следующих характерных зон: шва, основного металла и зоны сплавления — полосы шириной около 0,5 мм, непосредственно прилегающей к сварному шву. Если основной металл состоит из а-твердого раствора и небольших участков выделившейся главным образом по границам зерен α-фазы (Mg_2Al_3), то участок зоны сплавления богат крупными включениями β-фазы по всей протяженности.

Повышенная концентрация β-фазы в зоне сплавления приводит к образованию на поверхности этой зоны пористой окисной пленки магнезита MgO, обладающей пониженной коррозионной стойкостью по сравнению с плотной пленкой Al_2O_3MgO, покрывающей остальные участки сварного соединения, в результате чего зона сплавления оказывается анодной по отношению к остальным зонам сварного соединения, чем и объясняется пониженная коррозионная стойкость этой зоны.

По степени снижения несущей способности зона сплавления оказалась примерно в 1,5 раза ниже коррозионной стойкости основного металла при камеральных испытаниях и в 4 раза — при испытании в натурных условиях. Следовательно, как и для высокопрочных сталей, при проектировании конструкций из алюминиевых сплавов при выборе конструкции и типов соединений, сварочных материалов и режимов

сварки следует учитывать коррозионную стойкость сварных соединений.

4.2. КОНЦЕНТРАЦИЯ МАТЕРИАЛА.

Большое влияние на уменьшение интенсивности коррозионных процессов в элементах конструкций оказывают конструктивные мероприятия. Известный в проектировании принцип концентрации материала в элементах сооружения представляет собой эффективное средство не только экономии металла, но и повышения срока службы конструкций [58]. Принцип этот основан на необходимости придавать сечениям элементов сооружения при прочих равных условиях возможно меньшую поверхность. Уменьшение площадей сечении от коррозионных поражении во времени будет относительно меньшим. Об этом свидетельствуют данные рис. 4.1, где показаны два варианта сечений:

рально-сжатых колонн первой *а* при шаге *l* и второй *6 — 2l.* Сечения их подобраны так, что у второй колонны толщина элементов изменена в 2 раза. Таким образом, площадь сечения второй колонны в 2 раза больше, чем первой, поверхности же их примерно одинаковы и равны *S=(2a+Ь)2.* Но так как одной колонне варианта *б* соответствуют две колонны варианта *а*, то поверхность их в 2 раза больше. В соответствии с этим при скорости коррозии *v,* мм/год, через *t* лет потери сечений у двух колонн по варианту *а* будут в 2 раза больше, чем у одной колонны по варианту *б.*

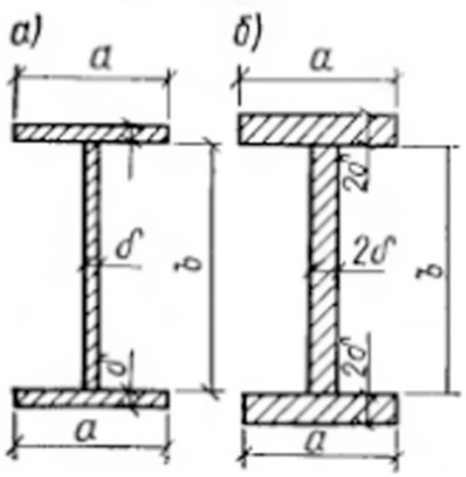


Рис.4.1. Поперечное сечение коллоны

Действительно:

$$2\Delta F_1 = 2[(2a+b)\delta - (2a+b)(\delta - vt)] \text{ и}$$

$$\Delta F_2 - (2a+b)2\delta - (2a+b)(2\delta - vt), \text{ откуда}$$

$$2\Delta F_1 = 2(2a+b)vt \quad \text{и} \quad \Delta F_2 = (2a+b)vt$$

Кроме того, относительное уменьшение сечения второй колонны во времени от коррозии (уменьшение ее прочности) в 2 раза меньше, чем для первой колонны*:

$$\frac{\Delta F_1}{F_1} = \frac{(2a+b)vt}{(2a+b)\delta} = \frac{vt}{\delta}, \quad \frac{\Delta F_2}{F_2} = \frac{(2a+b)vt}{(2a+b)2\delta} = \frac{vt}{2\delta}.$$

Это подтверждает эффективность реализации принципа концентрации металла для сжатых и растянутых элементов.

Такой принцип справедлив и для изгибаемых элементов, так как площадь двутавра $F = \delta(2a + b)$ и его момент инерции $J = \delta(b^3/12 + ab^2)$ являются линейными функциями от толщины сечения σ, и при прочих равных условиях (равенства b и F) предпочтительней (с точки зрения борьбы с коррозией) будет та балка, толщина сечения которой σ больше. Но так как возросшая толщина стенки в изгибаемых элементах ведет к увеличению площади при малом приросте момента инерции балки, то при равных площадях балок рационально варьировать лишь толщиной горизонтальных полок. Следствием этого является несколько меньшая эффективность принципа концентрации металла в отношении изгибаемых элементов.

Указанный принцип при проектировании реализуется применением шага колонн и стропильных ферм 12 м и более, что особенно важно для конструкций, эксплуатирующихся в сильно- и среднеагрессивных средах. Кроме того, такие конструкции следует проектировать сплошносетчатыми.

[*] В приведенных подсчетах не введен коэффициент продольного изгиба *φ*, так как в обоих вариантах остается неизменным размер *b,* и поэтому радиусы инерции относительно обеих главных осей не изменяются.

4.3. ВЫБОР ФОРМЫ СЕЧЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ.

Помимо концентрации металла и увеличения толщины сечений в снижении скорости поражения коррозией элементов сооружений существенную роль играет конструктивная форма сечения. Разнообразие конструктивных форм и типов сечений стержней приводит к тому, что разные виды строительных конструкций корродируют различно. Придавая элементу ту или иную форму, можно получить различные сроки службы сооружения. При прочих равных условиях сечения с меньшей поверхностью будут коррозионно более стойкими.

Показатель слитности сечения (отношение площади сечения к его периметру) характеризует коррозионную стойкость только тогда, когда коррозионные разрушения равномерны на всех участках сечения элемента, и, следовательно, когда интересует абсолютная величина коррозии. По коэффициенту β=P/F в первом приближении можно проанализировать коррозионную стойкость различных профилей проката. Такой анализ проведен в работе [49], а его результаты представлены в [51]. В результате анализа показано, что основным недостатком сортамента является незначительная устойчивость малых профилей против коррозии.

Необходимо иметь в сортаменте дополнительно более толстостенные профили в малых номерах, например, уголки 75Х14, швеллеры и двутавры с более толстыми полками и стенками, более толстостенные трубы и т. д.

В работе [51] на примере однопролетного цеха показана возможность удовлетворения требований коррозионной стойкости использованием принципа концентрации металла, а также назначением необходимых толщины и формы сечения элементов, устойчивых в агрессивной среде.

Натурные и экспериментальные исследования показали [25], что в условиях эксплуатации коррозия на различных участках поверхности элемента неодинакова. Значительное влияние на коррозионный износ оказывает и положение элемента в пространстве. Основной причиной разной коррозионной стойкости элементов различных конфигураций и положения в пространстве является неодинаковая степень запыления, увлажнения н высыхания на различных участках поверхности элемента. Количественные характеристики зависят также от периметра сечения, его отношения к площади поперечного сечения, характера агрессивной среды, свойств конструкционного материала. Например, большая неравномерность износа низколегированных сталей по сравнению с углеродистой приводит к более существенному влиянию формы сечения на износ элементов из низколегированных сталей.

Степень влияния конструктивной формы оценивается коэффициентом k_{φ}, который представляет собой отношение износа (потерь массы, глубины проникания и т. д.) элемента произвольного поперечного сечения к износу элемента, принятого за эталон (труба). Этот коэффициент выражает и отношение скоростей коррозии на сравниваемых элементах. Аналогично определяется коэффициент влияния положения элемента в пространстве k_{α} как отношение износа произвольно расположенного элемента к эталонному (горизонтальному). Полученные экспериментально k_{φ} и k_{α} для различных сталей и алюминиевых сплавов приведены в табл. 4.2 и 4.3.

Таблица 4.2

		Значение k_{φ} при типе сечения			
Материал конструкции	труба	замкнутое коробчатое сечение*	Лист одиночный прокатный или гнутый профиль	двутавр	составной профиль**
Углеродистая сталь и сталь марок 10ХСНД, 15ХСНД	1	1.1	1.4	1.8	2
Низколегированная сталь, кроме стали марок 10ХСНД, 15ХСНД	1	1.3	2	2.2	2,5

Алюминиевые сплавы	1	1.1*** --------- 1.1	1.4 ---------- 2.3	2.4 --------- 2.4	1.8 -------- 2.3

• Кроме гнутого профиля незамкнутого сечения (внутренняя поверхность замкнутых профилей изолирована от воздействия среды).
•• Тавровое сечение из двух уголков, незамкнутые коробчатые, двутавровые сечения из швеллеров или гнутых профилей.
• Над чертой — при равномерной коррозии, под чертой — при питтиигоиой коррозии.

В некоторых случаях могут быть отступления от полученных соотношений. Например, при обильном конденсате продукты коррозии смываются с поверхности вертикальных элементов интенсивнее, чем с горизонтальных, и скорость их коррозии увеличивается. Если пыль обладает защитными свойствами (в зависимости от се состава), то вследствие

Таблица 4.3

Угол наклона	Сталь				Алюминиевый сплав
	Значение k_α при типе сечения				
	труба, замкнутое коробчатое сечение	лист.одиночный, прокатный или **гнутый** профиль	двутавр	составной профиль	лист, одиночный. прокатный или прессованный профиль
1	1	1	1	1	1
45	0,6	0,7	0,9	0,8	0,9* --- 1.1
90	0,4	0,5	0,8	0,6	0,9* --- 1.1

• Над чертой — при равномерной коррозии, аса чертой — при питтинговой Коррозии

большей толщины слоя и плотности пыли на горизонтальных элементах скорость коррозии их может быть меньше, чем на наклонных и

вертикальных элементах.

Это свидетельствует, что переход от традиционных типов сечений из двух уголков, соединенных в тавр, на трубчатые или одиночные уголки может снизить коррозионный износ в 1,2—2,5 раза.

Кроме того, более стойкие типы сечений улучшают качество нанесения защитных покрытий и срок их службы. Поэтому [116] запрещает применение тавровых сечений из двух уголков, крестовых сечений из четырех уголков, незамкнутых прямоугольных сечений, двутавровых сечений из швеллеров в зданиях и сооружениях для производств со средне- и сильноагрессивными средами. Оценивать коррозионную стойкость элементов и конструкций при проектировании можно по показателю коррозионной стойкости элементов

$$\Pi_{\text{кор}} = \left(V_{\text{стз}}/V_{\text{факт}}\right)(\delta/K_{\text{из}}) \qquad (4.4)$$

где $V_{\text{стз}}$—скорость коррозии стали Ст3 в эксплуатационных условиях проектируемого объекта (по данным обследований); $V_{\text{факт}}$ — фактическая или предполагаемая скорость коррозии проектируемого элемента в тех же условиях (с учетом материала, напряженного состояния, эффективности защитных покрытий и т. п.); δ — средняя толщина сечения элемента, см; $K_{\text{из}}$ — коэффициент коррозионного износа элемента, комплексно характеризующий влияние формы сечения и положения элемента в пространстве и представляющий собой произведение k_{ϕ} и k_{α}.

Для достижения одинакового относительного износа элементов конструкций, т. е. одинакового темпа снижения несущей способности в результате коррозионного разрушения в процессе эксплуатации, нужно проектировать конструкции таким образом, чтобы показатели коррозионной стойкости $\boldsymbol{\Pi_{\text{кор}}}$ всех элементов не отличались более чем в 1,5 раза; значение $\boldsymbol{\Pi_{\text{кор}}}$ для элементов, эксплуатирующихся в сильноагрессивной среде, должно быть не менее 0,8, в среднеагрессивной — не менее 0,6.

Предлагаемая методика позволяет, во-первых, обоснованно выбрать конструктивную форму элементов при проектировании. Для вертикальных стержней, например, нет необходимости применять трубчатые сечения (с точки зрения коррозионной стойкости), так как скорость коррозии горизонтальной трубы и вертикального тавра из двух уголков практически одинакова.

Во-вторых, в зависимости от фактической коррозионной стойкости для конкретных эксплуатационных условий можно определить минимальную толщину сечения элемента по заданной надежности к любому моменту срока службы.

В-третьих, может быть дифференцированно определена минимальная толщина сечения элемента, мм, в зависимости от формы и

положения в пространстве, как это сделано, например, в табл. 4.4. для стальных конструкций при соотношении $\nu_{ст3}/\nu_{факт} = 1$.

Таблица 4.4

Угол наклона, град.	Форма сечения							
	О		□					
	СтЗ	НЛ	СтЗ	НЛ	СтЗ	НЛ	СтЗ	НЛ
0	6*/8**	6/8	7/9	8/11	9/12	12/16	12/16	16/20
45	4/5	4/5	5/6	5/7	6/8	9/12	10/14	12/16
90	3/4	3/4	3/4	3/4	5/6	6/8	8/10	10/12

* Для среднеагрессивной среды.
**Для сильноагрессивной среды.

Снижая скорость коррозии высококачественным н своевременным нанесением защитных покрытий, применением материала с повышенной коррозионной стойкостью, уменьшением агрессивности эксплуатационной среды (т. е. $\nu_{факт}/\nu_{ст3<1}$), предельно допустимую толщину сечения можно уменьшить.

В-четвертых, ограничив фактическую скорость коррозии, можно разработать стратегию эксплуатации конструкций, обосновать выбор и сроки возобновления защитных покрытий.

Срок службы стальных конструкций зависит и от конструктивных решений, которые не всегда оптимальны с точки зрения коррозионной стойкости. Такие общеизвестные требования, как отсутствие щелей и пазух, свободный доступ для осмотра и окраски конструкций, не всегда выполняются.

4.4. ВЛИЯНИЕ КОРРОЗИОННЫХ РАЗРУШЕНИЯ НА НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ КОНСТРУКЦИЙ

Свойства материалов и, следовательно, несущая способность конструкции не являются неизменными. Они изменяются во времени в зависимости от условий работы сооружений, от воздействия эксплуатационной среды и коррозионных поражений. Несущая способность элементов металлических конструкций в процессе эксплуатации является случайной функцией ряда независимых аргументов, из которых определяющими являются механические свойства металла и геометрические характеристики сечений элементов. Коррозионный износ не полностью характеризует поведение сталей и алюминиевых сплавов в конструкциях, особенно при неравномерном коррозионном разрушении поверхности.

В табл. 4.5 приведены результаты механических испытаний после эксплуатации образцов в электролитном цехе. Как видно, после трехлетней экспозиции изменения величин $\sigma_в$ и $\sigma_т$ наибольшие у СтЗ (~ 10%) и меньшие у

Таблица 4.5

Марка стали	Срок экспозиции, годы	$\sigma_в$		$\sigma_т$		σ	%
		МПа	%	МПа		мм	
Ст3	Эталон 1.5 3	460 438 420	100 95 91	316 292 286	100 92 90	31,2 30,9 30,8	100 99 99
15Г2СФгк	Эталон 1.5 3	525 525 488	100 100 92	460 443 442	100 97 97	8 6,6 5,8	100 83 72
15Г2СФто	Эталон 1.5 3	725 720 693	100 99 96	68G 685 680	100 100 99	5.2 4,5 3,8	100 86 79
15ХГ2СМФРто	Эталон 1.5 3	894 864 850	100 97 95	730 679 670	100 93 92	4 3 2	100 75 50
18Г2АФпс	Эталон 1.5 3	546 532 519	100 I9895	417 407 400	100 98 96	30,7 29,5 30	100 97 97
15Г2АФДпс	Эталон 1.5 3	538 526 520	100 98 97	442 425 423	100 96 96	27 26,9 27	100 100 100

сталей повышенной и высокой прочности (~5%). Обратная зависимость зафиксирована для удлинения σ : оно практически не меняется у пластичных сталей и сильно падает у сталей, более чувствительных к концентрации напряжений, - на 27—28 % у стали 15Г2СФ и на 50 % у стали 15ХГ2СМФР.

Для уточнения факторов, ответственных за снижение несущей способности, были проведены дополнительные испытания образцов из

Ст3 со статистической оценкой остаточной после коррозионных испытаний толщины сечения образцов [26]. Результаты этих испытаний приведены в табл.4.6.

Анализ этих данных свидетельствует, что основная доля уменьшения $\sigma_в$ и $\sigma_т$ объясняется потерей толщины сечения в результате износа К0 и в значительно меньшей степени сказывается изменение механических свойств в результате нарушения структуры поверхностно-

Таблица 4.6

Среда	По временному сопротивлению		По пределу текучести		По относительному удлинению	Относительный коррозионный износ (потеря сечения, %)
	$K_{\sigma_{вр}}$	$K^0{}_{\sigma_{вр}}$	$K_{\sigma_т}$	$K^0{}_{\sigma_т}$	K_ε	
Общезаводская	0,93	0,75	0,89	0,72	0,85	18
Коррозионная	0,98	0,89	0,96	0,87	0,88	9

Примечание. $K^0{}_\sigma = \sigma^0/\sigma_{эт}\,; K_\sigma = \sigma/\sigma_{эт}$, где – механическая характеристика стали до воздействия агрессивной среды; $\sigma^0\,, \sigma$ - то же, после воздействия агрессивной среды; σ^0 определена по начальным сечениям образцов, а σ – по фактическим сечениям.

го слоя металла *К*. Небольшое снижение прочностных характеристик при растяжении объясняется тем, что при разрушении по вязкому механизму состояние поверхности влияет мало, так как зарождение разрушения происходит во внутренней части образца. Следует отметить, что с увеличением толщины образцов (при уменьшении относительного коррозионного износа) влияние коррозии на $\dot{O}_{вр}$ и $\dot{O}_т$ падает. Следовательно, уменьшение прочностных характеристик стали существенно только в случаях, когда коррозионные повреждения поверхности (при отсутствии межкристаллитной и внутрикристаллитной коррозии, коррозионного растрескивания) соизмеримы с толщинами элементов.

Поэтому учет изменений механических характеристик стали (дополнительно к уменьшению площади поперечного сечения) следует производить для элементов с начальной или остаточной после коррозии толщиной 5 мм и менее или если относительный коррозионный износ превышает 25%. В этих случаях (при исключении возможности хрупкого разрушения) дополнительно к учету изменения площади поперечного сечения элемента следует в слабоагрессивной среде

снижать расчетное сопротивление стали на 5%, в среднеагрессивной — на 10 и в сильноагрессивной — на 15%. В остальных случаях изменение несущей способности элементов оценивается по изменению площади его поперечного сечения в результате коррозионного износа, причем изменение радиуса инерции сечения можно не учитывать.

Из результатов видно, что пластичные стали оказываются более чувствительными к коррозионным разрушениям, особенно это относится к сталям высокой прочности, т. е. механизм влияния коррозионных поражений на хрупкую прочность сталей оказывается иным. Это явление особенно ярко выявилось при испытаниях образцов на ударную вязкость. Они проводились на образцах 1 типа по ГОСТ 9454—60 в интервале температур от —70 до 20°С. Коррозионному воздействию подвергалась зона надреза образцов. За условный порог хладноломкости принималась минимальная температура испытаний, при которой ударная вязкость а= 0,3 МДж/м^2.

После трехлетних коррозионных испытаний ударная вязкость снижается на всем интервале температур на 0,3—0,5 МДж/м^2, и, что особенно важно, условный порог хладноломкости резко сдвигается в область положительных температур.

Следует отметить, что исследовались стали достаточно высокого качества: без коррозионных воздействий при —20 °С сталь ВСтЗсп имела ударную вязкость а=0,7... ...0,75 МДж/м^2; при —40°С сталь 18Г2ЛФпс — а= 1,4... ... 1,6 МДж/м^2; при —40°С сталь 14ГСМФР — а = 0,7 МДж/м^2. После трехлетней экспозиции в агрессивных средах свинцово-цинковых предприятий при —20 °С у стали ВСтЗсп а=0,3 МДж/м^2, а в случае воздействия общезаводской среды сталь вообще перестала удовлетворять требованиям СНиП 11-23-81; при — 40 °С у стали 14ГСМФР — а=0,3 МДж/м^2. Лишь у стали 18Г2АФпс с мелкозернистой структурой ударная вязкость при отрицательной температуре осталась достаточно высокой: при —40°С a= 1... 1,2 МДж/м^2 и a=0,8 ...0,85 МДж/м^2 в случае испытаний в общезаводской среде.

Приведенные результаты показывают, что под воздействием агрессивных сред ударная вязкость сталей интенсивно снижается, в отдельных случаях сталь не удовлетворяет требованиям стандартов. Меньше снижается ударная вязкость сталей с мелкозернистой структурой.

Для выявления механизма охрупчивающего влияния коррозии проведены специальные исследования с определением ударной вязкости образцов на стадии зарождения $a_я$ и распространения a_v разрушения [127]. Образцы различных типов для ударных испытаний из сталей ВСтЗсп, 09Г2 и 18Г2ЛФпс экспонировались в общезаводской промышленной атмосфере (средняя за период испытаний относительная влажность 85%, температура 5°С, концентрация сернистого ангидрида 0,05 мг/л) а также в коррозионной камере, имитирующей

эксплуатационные условия.

Результаты этих испытаний также показали снижение ударной вязкости после воздействия коррозии и повышение критических температур хрупкости на 15—30 °С. Чувствительность сталей к воздействию среды возрастает с понижением температуры испытаний. Для всех исследованных сталей после различных сроков воздействия агрессивной среды работа распространения разрушения $a_р$ практически не меняется. Падение удельной энергии разрушения образцов связано с уменьшением энергоемкости первого этапа разрушения — стадии зарождения $a_з$. Так, для ВСтЗсп в состоянии поставки $a_з$ при температуре —40 °С составила 0,06—0,75 МДж/м^2, а после годовой экспозиции во влажной камере близка к нулю. Закономерность изменения $a_з$ для сталей 09Г2 и 18Г2АФпс такая же. В некоторых случаях $a_з$ снижается больше: для стали 09Г2 в состоянии поставки отношение $a_з/a_р$ при температуре -60 °С равно 37, а после годовой экспозиции в агрессивной среде - 3.

Причины большего влияния коррозионных повреждений на ударную вязкость и сопротивление хрупкому разрушению сталей в целом по сравнению с механическими свойствами при растяжении в том, что при хрупком разрушении трещины зарождаются на поверхности или близко к поверхности металла. Следовательно, падение ударной вязкости, повышение переходных температур хрупкости после воздействия агрессивной среды связано с увеличением уровня концентрации напряжений вследствие коррозионного разрушения поверхности, что было подтверждено металлографическими и фрактографическими исследованиями. Этим же объясняется большая чувствительность к воздействию среды сталей, более чувствительных к концентрации напряжений.

Таким образом, если конструкция испытывает температурные, ударные или другие воздействия, способствующие возникновению хрупкого разрушения, неэффективная защита от коррозии может привести к выходу сооружения из строя после небольшого срока эксплуатации. Следовательно, при оценке работоспособности стальных конструкций, эксплуатирующихся при воздействии указанных факторов и агрессивных сред, необходимо учитывать повышенную опасность возникновения дефектов типа трещин.

Учитывать влияние коррозионных разрушений на снижение сопротивляемости стали хрупкому разрушению можно по изменению критической температуры хрупкости **Гкр** или по уменьшению коэффициента интенсивности напряжений *Кс*. Критическую температуру хрупкости материала конструкций для агрессивной среды можно определять по формуле:

$$T_{кр} = T^0{}_{кр} + \Delta T_{кр} + \Delta T^{кор}{}_{кр} \qquad (4.5)$$

где $T^0{}_{кр}$ — критическая температура стандартных образцов; $\Delta T_{кр}$—

сдвиг $T_{кр}$ вследствие технологических и конструктивных факторов;
$\Delta T^{кор}{}_{кр}$ сдвиг $T_{кр}$ в результате коррозионного износа.

Смещение критической температуры хрупкости:

Стали	СтЗ	09Г2	10Г2СІ	18Г2АФпс	14ГСМФР
$\Delta T^{кор}{}_{кр}$, °С	15	20-25	30	35	

Коэффициент интенсивности напряжений с учетом воздействия агрессивной среды $K^{кор}$ можно определить по формуле:

$$K^{кор} = Kc\beta_k \quad (4.6)$$

где Kc— коэффициент интенсивности напряжений исходного материала; β_k - коэффициент влияния коррозионных разрушений: для стали СтЗсп – 08, для остальных сталей - 0,7.

4.5. ВЫБОР СИСТЕМ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

Защита стальных конструкций от коррозии включает в себя методы, исключающие нанесение защитных покрытий (уменьшение степени агрессивности среды, легирование металлов, электрохимическая и ингибиторная защиты, рациональное конструирование), и методы с нанесением защитных металлических и неметаллических покрытий.

Конструкции, работающие в средне- и сильноагрессивных средах, требуют применение комплекса этих методов.

Антикоррозионные покрытия металлических конструкций могут быть: лакокрасочными, пластмассовыми, оксидными, фосфатными, металлическими и комбинированными (металлические с лакокрасочными или пластмассовыми). Механизм защитного действия в зависимости от состава покрытия может быть барьерным, электрохимическим и комбинированным (барьерно-электрохимическим). Большинство лакокрасочных и пластмассовых покрытий изолирует поверхность металла от агрессивной среды, однако в зависимости от пигментной части (при содержании цинкового порошка или алюминиевой пудры) они защищают металл и электрохимически. При нанесении на сталь металлических покрытий (цинка, алюминия, кадмия или их сплавов) реализуется электрохимический механизм защиты благодаря протекторному действию этих металлов, имеющих более отрицательный электрический потенциал и являющихся анодом по отношению к стали. Защита конструкций из алюминиевых сплавов осуществляется при помощи искусственно создаваемого на их поверхности окисного слоя, который

изолирует элемент от агрессивного воздействия окружающей среды, или нанесением лакокрасочных покрытий.

Учитывая трудность, а иногда и невозможность высококачественного возобновления защитных покрытий в процессе эксплуатации объектов без остановки технологического процесса, следует стремиться к максимальной долговечности противокоррозионной защиты. Этому требованию отвечают металлические (цинковые и алюминиевые) покрытия. Применяются два основных способа нанесения этих покрытий на стальные конструкции: горячий — погружение в расплав в специальных ваннах, и металлизационный — напыление сжатым воздухом расплавленных частиц. С экономической точки зрения и с точки зрения коррозионной стойкости горячее цинкование или алюминирование более эффективны, чем металлизация. В слабоагрессивной атмосфере металлические покрытия толщиной 60— 100 мк при горячем цинковании и 120—180 мк при металлизации сохраняют конструкции 30—50 лет [4, 32]. Исследование коррозионной стойкости и долговечности металлизацнонных покрытий в сильно- и среднеагресснвных средах [38] показало, что срок их защитного действия в среднеагрессивной атмосфере 10 лет, а в сильноагрессивной 1—2 года (при толщине слоя соответственно 100 и 200 мк). Так как металлические покрытия в процессе эксплуатации практически не возобновляются, в средне- и сильноагрессивных атмосферах необходимо по металлическим покрытиям наносить лакокрасочные покрытия (комбинированные). В настоящее время вследствие экономичности, удобства и простоты нанесения большая часть металлических конструкций защищается лакокрасочными покрытиями, но в ближайшие годы можно ожидать существенного увеличения объема применения металлических покрытий.

Лакокрасочное покрытие должно быть сплошным, беспористым, газоводонепроницаемым, химически стойким, эластичным, обладать хорошей адгезией, а также механической прочностью. В зависимости от условий эксплуатации защищаемых конструкций лакокрасочные покрытия делятся на восемь групп.

Основной причиной отказа лакокрасочных покрытий является подпленочная коррозия конструкций, по характеру протекания которой срок службы покрытия можно разделить на три этапа: время проникания агрессивных агентов среды к поверхности конструкций, время до начала коррозионного разрушения конструкции, время коррозионного разрушения конструкции до отказа лакокрасочного покрытия. Следовательно, защитные свойства покрытия определяются тремя факторами: механическими и химическими свойствами пленки покрытия, сцеплением пленки с защищаемой поверхностью и коррозионной стойкостью конструкционного материала.

Покрытие в большинстве случаев должно состоять из грунтовки, шпатлевки и покрывных слоев. Время проникания продуктов,

вызывающих коррозию, к поверхности конструкции зависит от проницаемости покрывных слоев и определяется их количеством и толщиной покрытия в целом. Для большинства лакокрасочных покрытий критическая (минимальная) толщина составляет 100—120 мк, ниже которой проницаемость в порах покрытия соизмерима с проницаемостью самой пленки [93].

Длительность второго этапа разрушения покрытия — задержки начала разрушения защищаемого металла — зависит от адгезии грунта к поверхности элемента и его ингибирующих свойств. Назначение грунтовки — обесточить прочное сцепление (адгезию) лакокрасочной пленки с поверхностью металла, т. е. она является как бы клеевым слоем, на котором держится все покрытие. Адгезия является одним из наиболее важных свойств покрытия и зависит от качества подготовки поверхности элементов под окраску. Недоброкачественная подготовка резко сокращает срок службы любого покрытия, так как коррозионный процесс происходит под покрытием, оно отслаивается и практически не защищает конструкцию от воздействия окружающей атмосферы. Необходимо тщательно готовить поверхность в зоне сварных швов, так как вследствие неполного удаления остающихся после сварки флюсов, щелочных шлаков, окислов и т. д. эти места становятся очагами коррозии, приводящими к отслоению покрытия.

Поверхность стальных конструкций после устранения на ней задиров, острых крошек, сварочных брызг, остатков флюсов, жировых и других загрязнений, а также старой краски должна быть очищена от продуктов коррозии. ГОСТ 9402—80 «Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Подготовка металлических поверхностей перед окрашиванием» классифицирует защищаемые поверхности по степени начальной окисленности (табл. 4.7) и качеству подготовки (табл. 4.8).

Таблица 4.7

Степень окисленности	Характеристика окисленности
А	Поверхность покрыта плотно сцепленной с металлом неосыпающейся ржавчиной
Б	То же, осыпающейся ржавчиной; после очистки от ржавчины обнаруживается изъязвление основного металла
В	То же, прокатной окалиной; ржавчина занимает 30— 70 % поверхности
Г	То же, прокатной окалиной; ржавчина отсутствует или занимает до 30 % поверхности

Наиболее распространенными способами очистки поверхности стали от окалины и продуктов коррозии являются: механический (пескоструйная, дробеструйная, дробеметная и гидропескоструйная

обработка поверхности, очистка механизированным инструментом и вручную стальными щетками), химический (обезжиривание специальными растворами, травление, очистка с помощью травильных паст), термический (пламенем ацетилено-кислородной или паяльной лампы) и обработка преобразователями ржавчины. Действие преобразователей ржавчины основано на взаимодействии его составляющих (преимущественно ортофосфорной кислоты) с окислами железа и переводе послед-

Таблица 4.8

Степень очистки от окислов	Характеристика очищенной поверхности
Первая	При осмотре с 6-кратным увеличением окалина и ржавчина не обнаруживаются
Вторая	То же, невооруженным глазом окалина и ржавчина не обнаруживаются
Третья	Не более чем на 5 % поверхности имеются пятна и полосы плотно сцепленной окалины, точки ржавчины, видимые невооруженным глазом; при перемещении на по-поверхности прозрачного квадрата размером 26х25 мм на каком-либо одном участке окалиной или ржавчиной занято не более 10 % поверхности
Четвертая	С поверхности удалены рыхлая ржавчина и отслаивающаяся окалина; до 20 % поверхности покрыто прочно сцепленной окалиной или ржавчиной. При перемещения по поверхности прозрачного квадрата размером 25Х Х25 мм на каком-либо одном участке поверхности, прочно сцепленной окалиной, ржавчиной занято до 30 %

них в нерастворимую пленку. В связи с недоработкой составов и сложностью технологии этот способ применяют для очистки малоответственных конструкции при толщине слоя продуктов коррозии не более 120 мк и только под лакокрасочное покрытие.

Выбор способа подготовки поверхности зависит от состояния поверхности конструкций и требуемой степени очистки (табл. 4.9), а также от его технико-экономических показателей.

Таблица 4.9

Способ удаления оксидов	Степень окисления поверхности			
	А	Б	В	Г
	Предельная степень очистки от оксидов			
Травление	Первая	Вторая	Первая	
Абразивный (дробеструйная, дробеметная, гидропескоструйная обработка, галтование, сухая обдувка металлическим песком, электрокордуном)	≫	≫	≫	
Обработка механизированным инструментом	Вторая	≫	Третья	
Обработка ручным инструментом	Третья	≫	Четвертая	-

Экспериментальные исследования [12] долговечности защитных покрытий выявили зависимость срока службы покрытия от способа подготовки поверхности:

- **Без подготовки (окраска по прокатной окалине) - Кп.п=1**
- **Обработка ручным инструментом (металлическими щетками) - Кп.п =1,1**
- **Травление - Кп.п = 1.3**
- **Опескострунвание - Кп.п =1,7**
- **То же и фосфатирование - Кп.п =2,5**

Увеличение долговечности покрытий, нанесенных по фосфатной пленке, связано с пассивирующим действием грунтов, содержащих фосфорную кислоту и хроматы цинка (типа ВЛ-02, ВЛ-023). Чтобы избежать окисления свежеочищенной поверхности, грунтовать металлоконструкции следует не позднее чем через 3—4 ч. после окончания очистки и при относительной влажности атмосферы не более 60 %.

Длительность третьего этапа разрушения покрытия — от начала коррозии металла до отслаивания и разрушения лакокрасочной пленки — зависит от коррозионной стойкости защищаемого металла. Поэтому общий срок службы покрытия зависит от материала защищаемой конструкции:

Для конструкций из стали СтЗ, СтТ 14Г2, 18Г, 09Г2 .....$К_{м=}1$

09Г2С, 10Г2С1, 14Г2АФ, 16Г2АФ, 18Г2АФ, 15Г2СФ, 12Г2СМФ, 14ГСФР……$К_м$=1.1

10ХСНД, 15ХСНД, 10ХНДП, 12ГН2МФАЮ, 12ХГН2МФБАЮ,

15Г2АФД, 10Г2С1Д..... $К_м$ = 1,4

По этой же причине срок службы лакокрасочного покрытия в составе комбинированного покрытия увеличивается по сравнению со сроком службы этого желакокрасочного покрытия настали в 1,6 раза. Долговечность слоя цинка йод лакокрасочной пленкой в 1,6 раза выше неокрашенного цинкового покрытия.

Для защиты строительных металлоконструкций от коррозии применяются различные лакокрасочные материалы [116], которые по типу связующею могут быть: пентафталевыми, глифталевыми, алкидно-уретановыми, алкидно- стирольными, эпоксидэфирными, масляными, полиэфирсиликоновыми, поливинилбутиральнымн, хлоркаучуковыми, масляно-битумными, фенольно-формальдегидными, перхлорвиниловыми и на сополимерах винихлорида — поли-уретановыми, эпоксидными, полистирольными, кремний-органическими. При выборе систем покрытий для конкретных эксплуатационных условий следует учитывать рекомендации ведомственных нормативных документов, а также качество подготовки поверхности конструкций, способность к адгезии применяемых грунтов, совместимость грунта и покрывных слоев, составляющих систему покрытия.

Первостепенное значение для выбора защиты имеет экономический показатель (минимум приведенных затрат на весь срок службы) эффективности применения того или иного материала и технологии очистки и окраски, которые определяются сопоставлением вариантов защиты в соответствии с Руководством [100]. Продолжительность межремонтного периода защитных лакокрасочных покрытий следует определять с учетом конструкционного материала, способа подготовки поверхности, формы сечения элементов и системы покрытия по формуле:

$$t_{\text{службы}}^{\text{покр}} = t_n K_{\text{м}} K_{\text{п.п}} K_{\text{ф}} , \quad (4.7)$$

где t_n — срок службы покрытия ка горизонтальном плоском элементе из малоуглеродной стали (определяется по ведомственным нормативным документам, результатам экспериментальных исследований, опыту эксплуатации н т. д.); $K_{\text{м}}$ — коэффициент влияния коррозионной стойкости конструкционного материала на срок службы покрытия; $K_{\text{п.п}}$ -то же, влияние подготовки поверхности; $K_{\text{ф}}$— то же, влияние конструктивной формы.

Лист, трубы……$K_{\text{ф}}$=1
Замкнутое коробчатое соединение……..…..$K_{\text{ф}}$=0,8
Одиночный прокатный и гнутый профиль…….$K_{\text{ф}}$=0,8
Составной профиль……...$K_{\text{ф}}$=0,6

Срок службы комбинированного покрытия можно ориентировочно назначить по формуле:

$$t_{\text{службы}}^{\text{комб}} = 1.6(t_{\text{службы}}^{\text{покр}} + t_{\text{службы}}^{\text{м}}) \quad (4.8)$$

где $t_{\text{службы}}^{\text{покр}}$ - срок службы лакокрасочного покрытия на опескоструенной поверхности по формуле (4.8) ; $t_{\text{службы}}^{\text{м}}$ — то же, металлического покрытия.

4.6. НАХОЖДЕНИЕ НАИБОЛЕЕ УДАЧНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ

Наряду с правильным выбором материала, исключением нежелаемых контактов, щелей и зазоров, конструктивная форма отдельных элементов и конструкции в целом оказывает существенное влияние на долговечность сооружения.

Скорость коррозии при этом оказывается зависимой от следующих факторов: слитности сечения; обтекаемости элементов; скопления влаги; общей компоновки и расположения элементов; метода соединения элементов; концентраций напряжений; методов нанесения или монтажа теплозащитных и изоляционных материалов; возможности нанесения и возобновления защитных покрытий; условий эксплуатации.

4.6.1. СЛИТНОСТЬ СЕЧЕНИЯ

Под слитностью сечения следует понимать отношение периметра сечения к его площади. Оно характеризует поверхность элемента, подвергающуюся воздействию коррозионной среды. По возможности необходимо стремиться к применению сечений с минимальной слитностью.

Конструкции, изготовленные из уголков и швеллеров (рис. 4.2), получили широкое распространение, так как они дешевы и просты в изготовлении. Однако с точки зрения устойчивости против коррозии они являются неудачными, ибо имеют ряд существенных недостатков: во-первых, велика поверхность, подвергающаяся воздействию коррозионной среды, во-вторых, они содержат большое количество щелей и зазоров, в которых накапливается влага и пыль. Кроме того, образуются большие поверхности, не поддающиеся очистке и окраске. Между тем сечения из уголков и швеллеров можно заменить на сплошную балочную конструкцию Т- и I-образной формы [210], в которой значительно сокращается

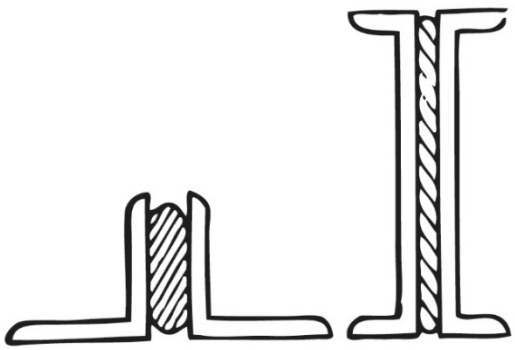


Рис. 4.2 . Неудачные конструкции из уголков и швеллеров, подвергающиеся коррозии

поверхность, подвергающаяся воздействию коррозионной среды, исключаются зазоры и облегчается окраска (рис. 4.3).

Т-образное сечение может заменить два уголка, а I-образное сечение — два швеллера. Так, например, Т-образное сечение 100х125 может быть применено для замены двух уголков размером 75х75. Масса двух уголков ~ 14,5 ***кг*** на 1 ***пог.*** л<, а масса 1 ***пог. м*** Т-образного сечения размером 100х125 равна 12,5 ***кг.*** Два уголка имеют примерно такой же радиус инерции в направлении оси X, как и Т-образное сечение 100х125 ***мм*** (0,93).

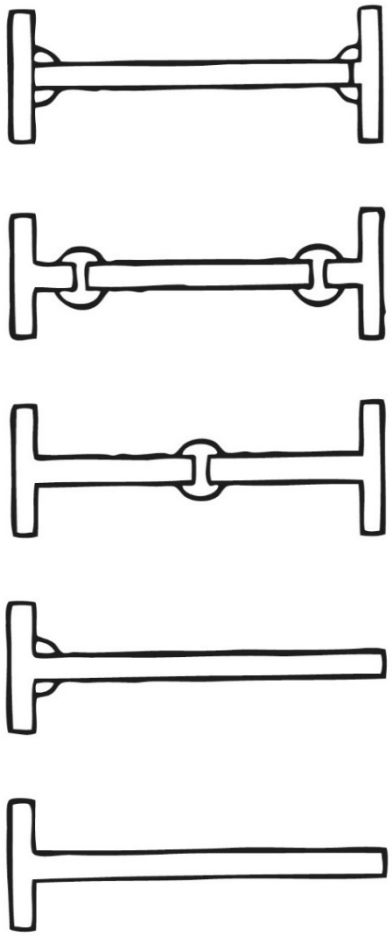


Рис. 4.3. Сплошные балочные конструкции таврового профиля повышенной коррозионной стойкости

Суммарная поверхность элемента из двух уголков равна ~0,3 ***м***^{2} на 1 ***пог. м,*** в то время как поверхность Т-образного сечения (100х125) равна ~0,225 ***м***^{2}***.*** Однако еще более важно, что в элементе» составленном из уголков, имеются зазоры и щели и значительная поверхность (~25%) не поддается очистки и окраске.

При замене швеллеров на балку I-образной формы также получается элемент, более стойкий в коррозионном отношении. Балка размером 200х137,5 может заменить два швеллера (200х62,5). Радиус инерции таких сечений одинаков. Масса 1 ***пог. м*** двух швеллеров ~34 ***кг,*** а масса 1 ***пог. м*** I-образной балки ~30 ***кг.*** Общая поверхность двух швеллеров свыше 1,2 ***м***^{2} на 1 ***пог. м***, а l-образной балки — лишь 0,9 ***м***^{2} на 1 ***пог. м.*** У швеллеров треть поверхности подвержена сильной коррозии и не поддается защите; у балки нет недоступных мест.

Кикин [44] для характеристики устойчивости сечения против коррозии вводит коэффициент β:

$$\beta = \frac{F}{0{,}383P}\ , \qquad (4.9)$$

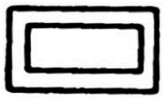
где F — площадь сечения; P — наружный периметр, подвергающийся воздействию коррозионной среды; 0,383 — коэффициент устойчивости против коррозии сечения из уголков толщиной 8 $мм$, принимаемого за единицу измерения.

Чем больше коэффициент β, тем устойчивее при всех прочих равных условиях, сечение. Наибольшей стойкостью должны обладать сечения, имеющие формы круглые и квадратные сплошные, круглые, трубчатые и прямоугольные с внутренней полостью, закрытой от воздухообмена заваркой торцов элементов. Большая стойкость подобных сечений обеспечивается меньшей поверхностью при одинаковой с другими сечениями площадью. Перечень наиболее выгодных в коррозионном отношении сечений приведен в табл. 4.10.

Как видно из табл. 4.10, при одинаковой площади кольцевые, коробчатые, а также круглые сплошные сечения имеют коэффициенты р в несколько раз больше, чем обычные сечения из уголков.

Таблица 4.10

КОЭФФИЦИЕНТ УСТОЙЧИВОСТИ РАЗЛИЧНЫХ СЕЧЕНИЙ ПРОТИВ КОРРОЗИИ

Форма сечения	Размеры сечения мм	Площадь сечения F, $см^2$	Наружный периметр сечения P, $см$	Коэффициент устойчивости против коррозии $\beta = \frac{F}{0{,}383P}$
	75×75×8	23,0	60,0	1,00
	100×100×12	45,5	80,0	1,49
	200	45,6	60,0	2,05
	100×100×12	45,5	40,0	2,98
	$d_н = 130$; $d_{вн} = 12$	45,0	40,5	2,88
	$d = 76$	45,5	23,9	4,95

4.6.2. ОБТЕКАЕМОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ

Другим весьма важным фактором, определяющим коррозионную стойкость конструкции, является ее обтекаемость. От этого фактора, по существу, зависит скорость испарения влаги с поверхности, а следовательно, и длительность протекания коррозионного процесса. Скорость испарения электролита с поверхности (время, необходимое до полного высушивания), в сильной степени зависит от конструктивной формы сечения элемента (рис. 4.4). Наиболее обтекаемым и быстро высыхающим сечением является трубчатое.

Крайне неудовлетворительным сечением оказалось коробчатое из

тонкого листа, для которого время полного высыхания оказалось в 2,23 раза выше, чем у трубчатого.

Сечения, скомпонованные из отдельных элементов с образованием щелей, также нежелательны. Хотя продолжительность испарения влаги с поверхности при обтекании воздухом для этих сечений оказалась всего лишь в 1,4—1,6 раза выше, чем у трубчатого, этот показатель может на практике при применении крупных профилей значительно возрасти вследствие увеличения глубины щелей. Обтекаемость элементов должна оказать существенное влияние на скорость коррозии.

Также существенным является характер распределения коррозии по сечению. Скорости коррозии отдельных участков сечения, характеризующиеся эпюрой, значительно различаются. Степень неравномерности в распределении коррозии достигает часто десяти единиц. Слитные сечения, не имеющие участков, в которых скопляется и длительно задерживается влага, частицы соли и пыль, корродируют более равномерно. Лучшие сечения в этом смысле - трубчатое и коробчатое двухстенчатое.

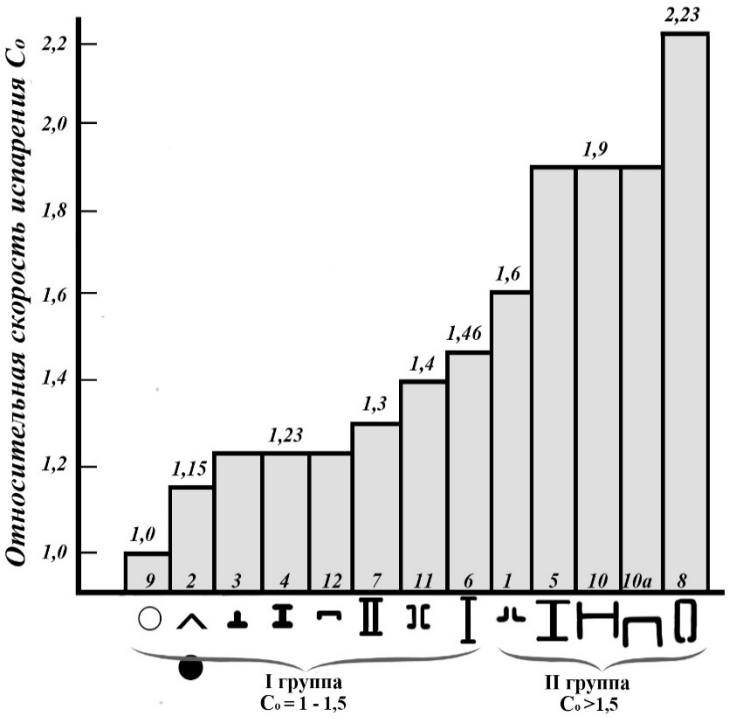


Рис. 4.4. Относительная скорость испарения влаги с поверхности различных элементов при обтекании воздухом

4.6.3.СКОПЛЕНИЕ ВЛАГИ

Третий фактор, подлежащий учету при конструировании, это исключение возможности скопления влаги. Хотя это требование кажется само собой разумеющимся, конструкторы и строители не всегда его выполняют.

Весьма важно обеспечить такое расположение элементов в конструкции, которое исключало бы скопление влаги. Удачные и неудачные примеры компоновки элементов приведены па рис. 4.5. Они не требуют особых пояснений. В тех случаях, когда по конструктивным соображениям невозможно обеспечить надлежащее расположение элемента, необходимо позаботиться об устройстве специальных осушающих отверстий или каналов, по которым скопляющаяся вода могла бы стекать.

Не менее важно предусмотреть хорошую вентиляцию в тех местах, где из-за конденсации возможно скопление влаги.

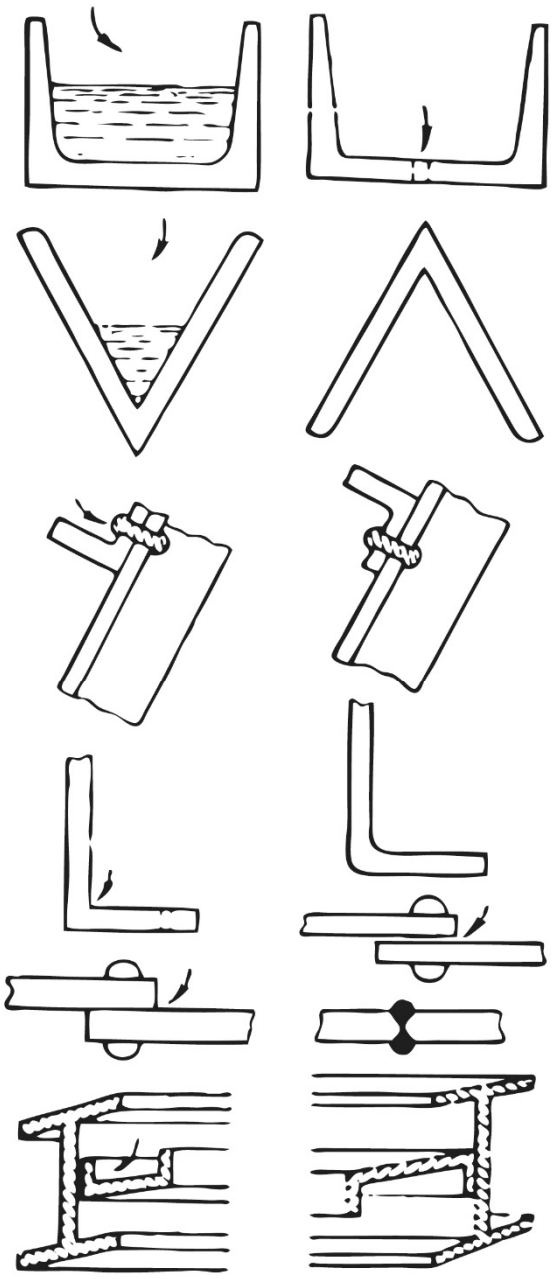


Рис. 4.5. Неудачные (а) и удачные (б) примеры расположения элементов

4.6.4. ОБЩАЯ КОМПОНОВКА И РАСПОЛОЖЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ

Помимо правильного выбора элементов, важно еще обеспечить такую компоновку их в конструкции, которая исключала бы возможность развития коррозии или сводила бы ее до минимума. Насколько указанное выше обстоятельство важно для продления срока конструкции,

покажем на примере опоры морских нефтяных эстакад.

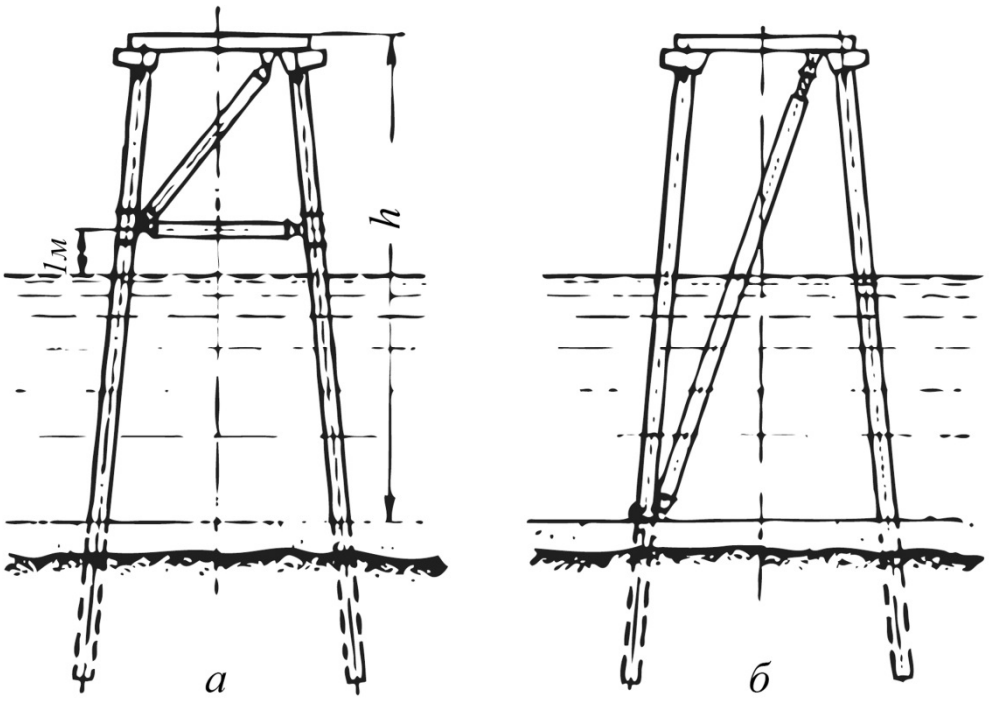


Рис. 4.6. Два возможных типа поперечных связей опор морских эстакад: а – поперечная связь выполнена в виде горизонтальной распорки и телескопического подкоса

Для морских условий наиболее приемлема в коррозионном отношении конструкции, изображенная на рис. 4.6, б (если только эти поперечные связи нельзя вынести за пределы зоны максимальной коррозии). В первом варианте, распорка находится в зоне наибольшей коррозии, а ее повторная защита затруднена.

4.6.5. МЕТОДЫ СОЕДИНЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ

Весьма важно также обеспечить такие методы соединения элементов, которые не способствовали бы развитию коррозии. В этом отношении клепаные конструкции хуже сварных. В клепаных конструкциях, если не принять меры к изоляции внутренних поверхностей хорошим лакокрасочным покрытием и прокладочным материалом, из-за накопления влаги в щелях и зазорах часто развивается коррозия. Процесс иногда протекает настолько быстро, что продукты коррозии начинают распирать соединение (рис. 4.7, *а,* б, *в).* При сварке же число щелей и зазоров сильно сокращается или может быть сведено к нулю. При этом листы могут быть соединены как встык, так и внахлестку. Сварку внахлестку необходимо

производить по всем открытым швам (рис. 4.7, *д*, *е, ж)*. В тех случаях, когда сварку применять нельзя (некоторые алюминиевые сплавы), рекомендуется элементы, подвергающиеся клепке, предварительно загрунтовать.

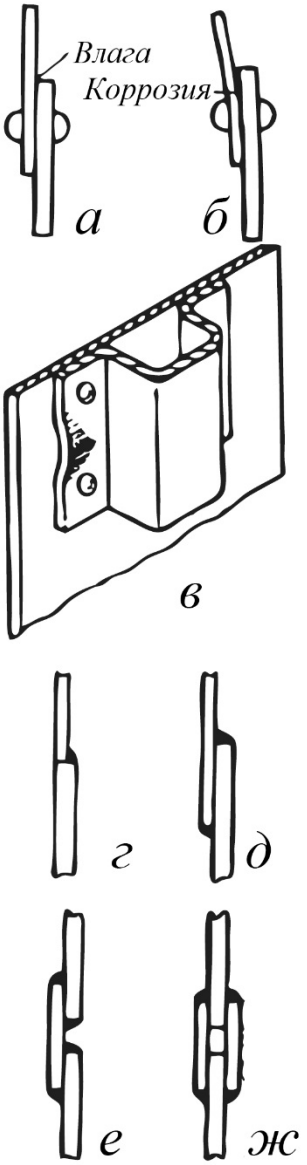


Рис. 4.7. Методы соединения листов и отдельных элементов в конструкции: а, б, в – клепка приводит к коррозии; г – сварка встык; д – сварка внахлестку; е, ж – сварка с накладками

4.6.6. МЕТОДЫ НАНЕСЕНИЯ И МОНТАЖА ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ И ИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Нанесение на поверхности металлических конструкций неметаллических материалов с целью теплозащиты, теплоизоляции или придачи огнестойкости может привести к усиленной коррозии конструкции, если только не принять необходимые меры предосторожности.

При контакте поверхностей металла с неметаллами (древесина, войлок, пробка, бумага, асбест и другие) последние должны быть сухими и не способствовать увлажнению поверхности металла. Перед применением изоляционного материала необходимо убедиться в том, что он не является коррозионно активным, т. е. не выделяет коррозионно активные агенты при попадании влаги.

Вещества для приклеивания теплоизоляции должны также быть проверены, чтобы они не вызывали коррозии. Изоляционные материалы оказывают большое влияние на конденсации) влаги, и поэтому при неправильной технологии их нанесения или монтажа часто наблюдаются случаи усиленной коррозии конструкций.

Дело в том, что изоляция поверхностей металла с целью отепления или защиты от воспламенения приводит к тому, что при охлаждении конструкции наружным холодным воздухом внутренняя сторона стенки охлаждается сильнее, чем в отсутствие изоляции, и поэтому приобретает часто температуру ниже точки росы.

Если изоляционный материал плотно прилегает к охлажденной поверхности и не образует зазоров и щелей, в которых может конденсироваться влага, то чаще всего влага стремится удержаться в изоляционном слое. Если же изоляционный материал не очень хорошего качества и плохо прилегает к поверхности металла, то в щелях и зазорах собирается электролит. Не имея свободного выхода, он может разрушить грунтовочное покрытие и принести к местной коррозии. Подобные случаи очень часто встречаются при использовании в качестве изоляционного материала минеральных волокон, загрязненных растворимыми сульфидами и сульфатами.

Если изоляционный материал смонтирован таким образом, что он неплотно прилегает к поверхности металла и образуется какой-то объем воздуха между изоляцией и металлом, то благодаря циркуляции воздуха большая часть водяных паров проходит через изолятор без конденсации в нем. Изменение температуры вдоль стенки таково, что влага конденсируется на охлажденной поверхности металла и вызывает коррозию.

Если влага удерживается в изоляционном слое, она может удаляться из него испарением благодаря капиллярности и выветриванию. При плотном прилегании изолирующего слоя к поверхности металла и правильном выборе самого изолирующего материала, который должен обладать хорошими водопроницаемыми свойствами или капиллярной структурой, можно добиться также быстрого перехода в изоляционный слой, а затем и наружу, влаги, сконденсировавшейся на поверхности металла. Для этого нужно температуру более теплой части изоляционного слоя после периода конденсации поднять выше точки росы. При наличии соответствующих свойств изоляционного материала (капиллярная структура) покрытие может быть полностью высушено в течение нескольких часов.

Если же волокна изоляционного материала негигроскопичны или обладают водоотталкивающими свойствами, то нет условий для перенесения влаги, сконденсировавшейся на охлажденной поверхности внутри помещения. Переноса влаги в этих условиях не будет до тех пор, пока температура изоляционного слоя не достигнет такого значения, при котором давление водяных паров в изоляционном слое не станет выше давления в воздушном пространстве.

Асбестовые волокна, состоящие из мелких волокон, обладают превосходной способностью поглощать влагу. Так называемые голубые асбесты или кроцидолитное волокно обладают самой высокой капиллярностью.

4.6.7. УЧЕТ КОРРОЗИИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ СООРУЖЕНИЙ

Учет явлений коррозии при проектировании металлических конструкций, машин, приборов должен производиться дифференцированно, исходя из агрессивности коррозионной среды. Не имеет смысла делать большие допуски на коррозию в тех случаях, когда среда не слишком агрессивна. По данным Гипромеза, уменьшение толщины стальных конструкций за счет коррозии на металлургических заводах в сильной степени зависит от характера производства и меняется в широких пределах— от 0,05 до 1,6 *мм/год*.

В прокатных, мартеновских и механических цехах скорость коррозии стальных конструкций составляет всего 0,05—0,07 *мм/год.* Некоторые же конструкции агломерационных фабрик, а также наружные сооружении корродируют со скоростью 0,5—1,6 *мм/год.* Из несущих конструкций каркасов здании наибольшей коррозии подвергаются перекрытия (стропильные и подстропильные фермы, прогоны, связи), имеющие относительно тонкостенные элементы. В значительно меньшей степени подвергаются коррозии подкрановые балки и колонны здании, имеющие относительно большую толщину.

При незначительных скоростях коррозии толщина элементов конструкций уменьшается к концу срока службы сооружении (40 лет) на 2 *мм,* что при толщине сечения, равной 8—10 *мм,* составляет 20-25%. Такое ослабление конструкций, согласно работе [44], не опасно, ибо запас прочности уменьшается с 1,5 до 1,2, что вполне допустимо.

Совсем иное положение создается при скоростях коррозии, превышающих 0,1 *мм/год.* Последние уменьшают толщину и площадь сечения на 40—50%, выводя из строя конструкции. При больших скоростях коррозии (>0,1*мм/год)* опасность еще усугубляется неравномерным поражением сечений по периметру.

При наличии обильных выделений газов и жидкостей из агрегатов, дыма от паровозов, паров воды и атмосферных осадков, просачивающихся внутрь цехов из-за неисправности кровель и водостоков, а также под влиянием мокрого грунта, некоторые элементы и узлы, а иногда целые конструкции выходят из строя за 4—8 лет вместо 40, на которые они рассчитаны. Быстрый выход из строя конструкций на металлургических заводах, по мнению Кикина [44], объясняется не только плохим отводом атмосферных осадков с кровель зданий, приводящим к разрушению кровель и водостоков, но и тем, что при проектировании не было учтено совместное воздействие на некоторые элементы конструкций таких агрессивных сред, как газы, пары воды и другие.

Почти 100%-ный выход из строя на некоторых заводах оснований колонн в течение 3 -5 лет в результате воздействия мокрого грунта может служить наглядным примером, к чему может

привести пренебрежение к явлениям коррозии при проектировании и строительстве промышленных сооружений. Между тем наука дала в руки инженеров целый комплекс научно обоснованных методов защиты конструкций в почве, позволяющих эксплуатировать их в течении 20—40 лет без повреждении (электрохимическая защита, дренаж, изоляционные покрытия и т. д.).

Учитывая различную степень агрессивности промышленных атмосфер. рекомендуется во избежание непроизводительного расхода металла назначать толщину элементов с учетом скоростей коррозии.

Предлагаемый Кикиным [44] метод расчета учитывает это обстоятельство. Нели обозначить через F — начальную площадь сечения, $\triangle$F — площадь сечения, пораженную коррозией, δ — толщину сечения, T — число лет службы сооружений, k- скорость коррозии в ***мм/год***, то относительное уменьшение площади сечения можно записать следующим образом:

$$\frac{\Delta F}{F} = \frac{kF}{\delta}, \qquad (4.10)$$

Из уравнения видно, что относительное уменьшение площадей сечений в результате коррозии обратно пропорционально толщине элементов. Иными словами, чем тоньше сечение, тем опаснее коррозия.

Пользуясь уравнением (4.10), можно определить, какова должна быть исходная толщина элемента, чтобы при заданной скорости коррозии конструкция через заданный промежуток времени сохранила минимально необходимый запас прочности. При этом автор исходит из того, что уменьшение запаса прочности конструкций с течением времени возможно в связи с уменьшением оставшегося срока службы конструкций. Сформулированное выше условие выполняется, если толщину элемента определять из следующего уравнения:

$$\frac{kT}{\delta} = \frac{\frac{\sigma_T}{k_2} - \frac{\sigma_T}{k_1}}{\frac{\sigma_T}{k_2}}, \qquad (4.11)$$

где σ_T — предел текучести стали;
k_2 и k_1 — коэффициенты запаса в начальный и конечный периоды.
Преобразуя формулу (4.11), автор получает:

$$\delta = \frac{k_1}{k_1 - k_2} kT, \qquad (4.12)$$

или

$$\delta = k\alpha T, \qquad (4.13)$$

Значения коэффициентов k_2 и k_1 принимаются равными:

для несущих конструкций покрытий при легких кровлях, а также для всех несущих конструкций открытых сооружений k_1 = 1,5; k_2 =1,15; α = 4,2;
для конструкций покрытий с тяжелыми кровлями массой 1м^2 поверхности более 100 *кг* k_1 = 1,5; k_2 = 1,4; α = 5,6.

По формулам (4.12) и (4.13) можно для атмосфер различной агрессивности определить необходимую толщину уголков, тавров и других сечений, имеющих полки и стенки одинаковой толщины.

Для сечений непостоянной толщины, имеющих разную толщину стенок (сварные и прокатные двутавры или швеллеры), рекомендуется в формулы (4.12) и (4.13) подставлять приведенную толщину, определяющуюся по формуле:

$$\delta_{\text{пр}} = \frac{2\delta_1 b + \delta_2 h_c}{2b + h_c}, \qquad (4.14)$$

-где δ_1 и δ_2 — средняя толщина полок и стенок, *мм*;
b и h_c — соответственно ширина полки и высота стенки, *мм*.

В отдельных случаях для сильно агрессивных атмосфер при определенной толщине элемента по формулам (4.12) и (4.13) можно принять коэффициент условии работы m <1 (0,80÷0,95), что приводит к увеличению толщины элемента. Расчет в этом случае ведется по формуле:

$$\delta = k\frac{\alpha}{m}T, \qquad (4.15)$$

Если в проектируемых цехах предусмотрены мероприятия, уменьшающие степень агрессивности атмосфер, а также лучшие средства противокоррознонной защиты (улавливание коррозионно-активных газов и паров, усиление аэрации здании, герметизация технологического оборудования, применение более стойких лакокрасочных покрытий), допускается в расчетные формулы подставлять не фактически наблюдаемые скорости коррозии, а уменьшенные в 1,5—2 раза. Практика проектирования, согласно работе [44], показывает, что по предложенным формулам можно подобрать сечения элементов для атмосфер, скорость коррозии в которых не превышает 0,15 ***мм/год.*** В случае более агрессивных атмосфер, когда невозможно полностью использовать подобранное сечение до предельно несущей способности, рекомендуется применять более коррозионностойкие стали (медистые, содержащие 0,2% Cu и низколегированные стали), а также более мощные сечения и элементы.

Учет явлений коррозии при проектировании промышленных

сооружении и машин должен производиться, как уже было указано, в зависимости от агрессивных свойств атмосферы и среды. Агрессивные свойства сред определяются содержанием агрессивных газов и паров, относительной влажностью воздуха, частотой выпадения осадков, температурными перепадами, обусловливающими конденсацию, скоростью испарения электролита с поверхности металла, временем контакта металла с электролитами [10], а если речь идет о жидких средах, то и свойствами самого электролита.

Прежде чем выбрать материал для конструкции и назначить его толщину, конструктор должен располагать сведениями о степени агрессивности той или иной атмосферы или жидкой среды. Если агрессивные свойства известных электролитов изучены достаточно полно и о них существует много справочных материалов [11—40], то агрессивные свойства атмосфер в различных отраслях промышленности изучены слабо.

Несколько более благополучно обстоит дело в черной металлургии, где на основе научных исследований и многолетних наблюдений составлена классификация зданий и сооружений заводов этой отрасли промышленности (44). При составлении классификации учитывались истинная скорость коррозии металлоконструкций в различных цехах, концентрации агрессивных газов (главным образом SO_2) внутри помещения и снаружи и относительная влажность воздуха.

По этой классификации все здания и сооружения разделены на 4 группы, но степени возрастания агрессивности атмосфер (табл. 4.11).

В зависимости от того, в какую категорию попадает проектируемое здание, минимальная толщина элементов рассчитывается по формулам, приведенным выше. В частности, например, при проектировании обычных стропильных и подстропильных ферм, сечения которых составлены из двух спаренных уголков, рекомендуются к назначению минимальные толщины, приведенные в табл. 70.
Для конструкций зданий, в которых воздушная атмосфера очень агрессивна (категория Г), рекомендуется применять сечения элементов с коэффициентом устойчивости против коррозии $\beta \geqslant 2$, поскольку сечения из уголков дают такую толщину, которая выходит за пределы обычно применяемых. Для уменьшения сечения элементов стропильных ферм в зданиях категории В и Г также рекомендуется применять медистые и низколегированные стали, обладающие повышенной стойкостью, а также алюминиевые сплавы АМг и

АВ.

До сих пор были рассмотрены пути уменьшения коррозии путем выбора конструктивных форм и рациональных методов конструирования элементов и конструкций, однако не менее важно при проектировании заводов и цехов предусмотреть ряд мероприятий, уменьшающих агрессивность среды — исключение неожиданного попадания агрессивных сред на металлические сооружения, непосредственно соприкасающиеся с ними, устройство вентиляции или аэрации, обеспечивающие своевременное удаление из цехов промышленных загрязнений воздуха, бесперебойное функционирование канализации для отвода агрессивных электролитов (пары которых могут попадать в воздушное пространство), изоляция наиболее вредных цехов (травильные, гальванические, гидро-металлургические, электролизные, химические) от других цехов или их удаление от всего промышленного комплекса.

Наиболее эффективным средством уменьшения агрессивности заводских атмосфер является улавливание агрессивных газов, паров кислот и ныли, выбрасываемых ТЭЦ, коксохимическими батареями, доменными печами, обжиговыми печами непосредственно в месте выброса.

Уменьшить агрессивность атмосфер можно также надлежащим выбором площадок и расположением цехов с учетом господствующих ветров. Предпочтение следует отдать хорошо продуваемым открытым

Таблица 4.11. Классификация зданий металлургических заводов по степени агрессивности атмосфер

		Признаки отнесения к категориям		
Категория	Примеры зданий металлургической промышленности	Виды, количество газов в атмосфере и внутри цехов	относи-тельная влажность воздуха, %	Расчетная скорость коррозии *мм/год*
А	Главные и другие здания сталеплавильных цехов и электросталеплавильных цехов; здания прокатных станов, складов проката, отделений нагревательных колодцев, механических, ремонтных н других	Неагрессивная или слабоагрессивная среда, содержащая SO_2 в количестве менее 0,01 *мг/л*	Менее 45	0,03-0.05; средняя 0.04

	цехов			
Б	Пролеты печей прокатных и трубопрокатных цехов, миксерные здания; литейные дворы, чугунолитейные цехи; галереи транспортеров кокса; открытые эстакады и др.	Агрессивная среда с более значительным содержанием $S0_2$ — от 0,01 до 0,015 *мг/л*	45—60	0.05—0.80; средняя 0,065
в	Травильные и меднолитейные цехи; купоросные установки; галереи разливочных машин; разгрузочные эстакады и другие	Агрессивная среда с содержанием SO_2 и H_2S от 0,015 до 0,02 *мг/л*	Более 60	0,08-0,12; средняя 0.10
г	Эстакады грануляции; коксовые силосы; тушильные башни; агломерационные фабрики	Сильноагрессивная среда с содержанием SO_2, более 0,025 *мг/л*	Более 60	Более 0.15

Таблица 4.12. Минимальные толщины элементов, назначаемые с учетом коррозии

Категория агрессивности среды	Минимальная толщина элементов *мм*			
	нерасчетных		расчетных с учетом коррозии	
	Ст. 3	низколегированная сталь	Ст. 3	низколегированная сталь
А	6	6	8(10)	6(8)
Б	8	6	10(14)	8(10)
В	10	8	14(18)	10(14)

Примечание. Толщина элементов, указанная в скобках, рекомендуется к назначению в элементах стропильных и подстропильных ферм, имеющих нагрузку от собственной массы покрытий белее 100 *кГ/м²*.

площадкам. Цехи и тепловые агрегаты, загрязняющие атмосферу, следует располагать с подветренной стороны по отношению к сборочным и другим цехам, не отличающимся агрессивностью атмосфер. Не следует располагать заводы и цехи в низких закрытых местах, откуда удаление вредных газов и паров естественным путем затруднено.

Рекомендуется особое внимание обращать на предупреждение местной коррозии конструкции. В частности, для предупреждения повреждения несущих конструкций из-за дефектов кровель, препятствующих спуску атмосферных осадков, Кикин [44] рекомендует:

- применять по возможности двускатные кровли с

достаточным уклоном и наружным отводом воды;

- при наружных водостоках свеси кровель принимать от 0,6 до 1,0 *м* в зависимости от высоты здания;
- в цехах, где имеются повышенные температуры (сталеплавильные цехи, прокатные горячие участки, нагревательные колодцы), применять кровли из плоской листовой стали (толщиной 3 —4 *мм)* или из волнистых листов алюминиевого сплава АМг;
- не допускать скопления пыли в водосточных трубах, желобах и накатах, регулярно производить профилактические и капитальные ремонты.

Для исключения коррозии башмаков колонн в результате контакта с грунтом повышать отметку фундамента наружных зданий, сооружений на 300—500 *мм* выше уровня планировки или производить бетонирование низа колонн до высоты 0,5 *м* над уровнем пола.

5. СОСТАВ И ОФОРМЛЕНИЕ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Курсовая работа состоит из графической части и расчетно-пояснительной записки и должна соответствовать «Стандарту предприятий»

Графическая часть работы состоит из схемы металлоконструкции до и после расчета долговечности изделия.

Расчетно-пояснительная записка выполняется на бумаге формата А4 (297х210) мм чернилами, четко и разборчиво от руки и должна соответствовать требованиям ЕСКД к текстовым документам. Объем расчетно-пояснительной записки должен составлять 20-25 с.

Введение.

Во введении описываются проблемы долговечности металлических конструкций. Обзор и состояние методов борьбы с коррозией и современные способы повышения долговечности металлических конструкций.

1. Учет коррозии при проектировании металлических изделий и конструкций.

В этом разделе должны быть приведены расчеты по объему коррозионных разрушений, расчет минимальной толщины стенки для данных условий коррозии, выбор оптимального конструктивного решения.

2.Защита металлических конструкций.

2.1 Выбор системы защитного покрытия от агрессивных сред.

В данном разделе приводится обоснование выбора материала для защиты металлических конструкций и изделий в зависимости от условий работы.

Описываются используемые материалы и технология нанесения покрытия.

2.2 Выбор защитного покрытия от чрезмерного перегрева конструкции.

В данном разделе приводится обоснование выбора материалов для защиты металлических конструкций и изделий от перегрева конструкции в зависимости от температуры эксплуатации.

Описываются используемые материалы и технология нанесения покрытия.

2.3 Мероприятия по снижению агрессивности среды.

В данном разделе описываются мероприятия по снижению агрессивности среды.

3.Перечень использованной литературы

В конце расчетно-пояснительной записки необходимо привести список использованной литературы с указанием фамилии и инициалов авторов, полного названия книги, места издания, издательства, года издания, страницы.

1. Учет коррозии при проектировании металлических изделий и конструкций.

РАСЧЕТЫ

1. Выбор сплава

Зависит от срока службы конструкции и степени износа в каждой конкретной агрессивной среде.

Рассчитываются коррозионные потери за весь срок службы для слабоагрессивных сред или: 10 лет для сильноагрессивных сред, 5 лет для конструкций, работающих в почвах:

$П^{т} = П*Т$

П - глубина коррозии по таблице мм/год, Т -время.

Вычисляются остаток стенки после коррозионных потерь:

$d\delta = (\delta^{0} - П^{т})/ \delta^{0}*100$

δ^{0}- начальная толщина стенки.

Сплав выбирается с условием: dδ -должно находиться в интервале 70-80 %.

Марка стали СтЗ	**Скорость коррозии, мм/год при группе агрессивности среды**			
	1	**2**	**3**	**4**
	Конструкции			
	V⩾***0,3***	**0,1 ⩽V<0.3**	**0,05< V <0,1**	**⩽0,05**
	Образец			
СтЗ	**0,2-0,4**	**0,05-0,1**	**0,01-0,06**	**0,001-0,005**
15Г2СФгк	**0,15-0,35**	**0,05-0,14**	**0,01-0,05**	**0,001-0,003**
15Г2СФто	**0,15-0,35**	**0,04-0,13**	**0,01-0,04**	**0,001-0,003**
15ХГ2СМФРто	**0,2-0,3**	**0,04-0,11**	**0,01-0,03**	**0,002-0,004**
14ГСМФР	**0,3—0,5**	**0,006-0,15**	**0,02-0,06**	**0,002-0,005**
10Г2С1	**0,2-0,4**	**0,05-0,15**	**0,02-0,06**	**0,002-0,005**
18Г2ЛФпс	**0,2-0,4**	**0,05-0,1**	**0,01-0,03**	**0,001 -0,003**
15Г2АФДПС	**0,15-0,25**	**0,03-0,08**	**0,01-0,03**	**0,001-0,002**

09Г2	**0,2-0,5**	**0,06-0,15**	**0,02—0,06**	**0,002-0,005**
18Г	**0,3—0,5**	**0,06-0,15**	**0,02-0,06**	**0,002-0,005**
10ХНДП	**0,1-0,2**	**0,02-0,05**	**0,01-0,02**	**0,001-0,002**

I сборочные, механические и ремонтные цехи, закрытые складские помещения;

II здания сталеплавильных и прокатных цехов (главные здания мартеновских печей, шихтовые дворы, отделения раздевания слитков, нагревательных колодцев, прокатных станов, складов заготовок и готовой продукции), обжиговые и агломерационные цехи;

III открытые конструкции, эксплуатируемые в индустриальной атмосфере, объекты связи, опоры линий 'передач, газопроводы, основные цехи строительной индустрии, здания металлургических комбинатов (миксерные и литейные дворы, пролеты печей и томильных колодцев, .прокатных станов, разливочных машин, открытые копровые цеха, травильные отделения непрерывного травления прокатных цехов), некоторые цехи цветной металлургии (обогатительные, сушильные и др.), химических комбинатов, открытые эстакады и т. п.;

IV основные цехи медного, свинцово-цинкового, никелевого производства, цехи химической промышленности, сернокислотные, предприятия синтетических материалов, травильные отделения прокатных цехов периодического травления, галереи разливочных машин, грануляционные отделения, коксовые бункера, тушильные башни, некоторые конструкции агрофабрик, гидрометаллургические цехи, отделения глиноземных цехов и т. п.

2. Слитность сечения

Под слитностью сечения следует понимать отношение периметра сечения к его площади. Оно характеризует поверхность элемента, подвергающуюся воздействию коррозионной среды. По возможности необходимо стремиться к применению сечений с минимальной слитностью.

Пользуясь уравнением (1), можно определить, какова должна быть исходная толщина элемента, чтобы при заданной скорости коррозии конструкция через заданный промежуток времени сохранила минимально необходимый запас прочности:

$$\delta = \frac{k_1}{k_1 - k_2} \text{ПТ} \qquad (1)$$

k_1 и k_2 — коэффициенты запаса в начальный и конечный периоды. Значения коэффициентов принимаются равными:

для несущих конструкций покрытий при легких кровлях, а также для всех несущих конструкций открытых сооружений k_1 = 1,5 k_2 = 1,15; для

конструкций покрытий с тяжелыми кровлями массой 1 $м^2$ поверхности более 100 *кг* k_1 = 1,5; k_2 = 1,4;

3. Концентрация металла

Согласно полученной толщине подбираются новые элементы в конструкции из сортаментов металлопроката согласно принципу "концентрации материала". Принцип этот основан на необходимости придавать сечениям элементов сооружения при прочих равных условиях возможно меньшую поверхность. Разрешается использовать любые сортаменты, сохраняя исходную площадь поперечного сечения.

4. Оценка коррозионной стойкости элементов и конструкций

Оценивать коррозионную стойкость элементов и конструкций при проектировании можно по показателю коррозионной стойкости элементов:

$$П_{кор} = (V_{спл}/V_{факт})*(\delta/К_{из}), \qquad (2)$$

где $V_{спл}$ - скорость коррозии сплава в эксплуатационных условиях проектируемого объекта (по данным обследований); $V_{факт}$ - фактическая или предполагаемая скорость коррозии проектируемого элемента в тех же условиях (с учетом материала, напряженного состояния, эффективности защитных покрытий и т. п.); δ - средняя толщина сечения элемента, см; $К_{из}$ - коэффициент коррозионного износа элемента, комплексно характеризующий влияние формы сечения и положения элемента в пространстве и представляющий собой произведение $k_ф$ и $k_α$.

Для достижения одинакового относительного износа элементов конструкций, т. е. одинакового темпа снижения несущей способности в результате коррозионного разрушения в процессе эксплуатации, нужно проектировать конструкции таким образом, чтобы показатели коррозионной стойкости $П_{кор}$ всех элементов не отличались более чем **в** 1,5 раза; значение $П_{кор}$ Для элементов, эксплуатирующихся в сильноагрессивной среде, должно быть не менее 0,8, в среднеагрессивной — не менее 0,6.

Материал конструкции	Значение $k_ф$ при типе сечения				
	труба	замкнутое коробчатое сечение*	лист.одиночный.прокатный или гнутый профиль	двутавр	составной профиль
Углеродистая сталь и сталь марок 10ХСНД, 15ХСНД	1	1.1	1.4	1.8	2
Низколегированная сталь, кроме стали марок 10ХСНД, 15ХСНД	1	1.3	2	2.2	2,5

Угол наклона в град.	Значение $k_α$.при типе сечения			
	труба, замкнутое коробчатое сечение	лист.одиночный, прокатный или **гнутый** профиль	двутавр	составной профиль
1	1	1	1	1
45	0,6	0.7	0.9	0.8
90	0.4	0.5	0.8	0.6

Снижая скорость коррозии высококачественным н своевременным нанесением защитных покрытий, применением материала с повышенной коррозионной стойкостью, уменьшением агрессивности эксплуатационной среды (т. е. $V_{спл}/V_{факт} <1$), предельно допустимую толщину сечения можно уменьшить.

5. Выбор системы защитного покрытия от агрессивных сред. Срок службы ЛКМ

Продолжительность межремонтного периода защитных лакокрасочных покрытий следует определять с учетом конструкционного материала, способа подготовки поверхности, формы сечения элементов и системы покрытия по формуле:

$$t^{покр}_{службы} = t_n K_м K_{п.п} K_ф \qquad (3)$$

где t_n — срок службы покрытия ка горизонтальном плоском элементе из малоуглеродной стали (определяется по ведомственным нормативным документам, результатам экспериментальных исследований, опыту эксплуатации н т. д.); $K_м$ — коэффициент

влияния коррозионной стойкости конструкционного материала на срок службы покрытия; $K_{п.п}$ -то же, влияние подготовки поверхности; $K_ф$ — то же, влияние конструктивной формы.

Лист, трубы	$K_ф = 1$
Замкнутое коробчатое сечение	$K_ф = 0.8$
Одиночный прокатный или гнутый профиль	$K_ф = 0.8$
Составной профиль	$K_{ф=}0,6$

6. Задания для самостоятельной работы студентов

Контрольные вопросы

1. Общие понятия о надежности и долговечности строительных конструкции.
2. Способы увеличения надежности и повышения долговечности конструкций каркаса промышленных зданий.
3. Особенности эксплуатации конструкций зданий.
4. Дефекты и повреждения стальных конструкций. Общая характеристика.
5. Повреждения конструкций покрытия.
6. Общие понятия о надежности и долговечности строительных конструкций.
7. Способы увеличения надежности и повышения долговечности конструкций каркаса зданий.
8. Особенности эксплуатации конструкций зданий и сооружений.
9. Дефекты и повреждения стальных конструкций. Общая характеристика. Повреждения конструкций покрытия.
10. Повреждения колонн.
11. Повреждения подкрановых конструкций.
12. Повреждения прочих конструкций.
13. Химическая коррозия. Виды химической коррозии.
14. Термодинамика химической коррозии.
15. Кинетика химической коррозии.
16. Влияние различных факторов на скорость высокотемпературной коррозии.
17. Электрохимическая коррозия металлов.
18. Механизм протекания электрохимической коррозии.
19. Двойной электрический слой и электродные потенциалы металлов.
20. Виды электродов. Термодинамика электрохимической коррозии металлов.
21. Кинетика электрохимической коррозии
22. Прогнозирование надежности долговечности стальных конструкций

23. Анализ причин возникновения дефектов и повреждения
24. Влияние повреждений на стальные конструкции
25. Расчет термодинамической возможности
26. Расчет скорости химической коррозии
27. Расчет термодинамической возможности
28. Расчет скорости электрохимической коррозии
29. Основные виды коррозии в строительстве: атмосферная коррозия, почвенная коррозия, коррозия блуждающими токами.
30. Способы увеличения надежности и повышения долговечности конструкций каркаса зданий.
31. Методы лабораторных коррозионных испытаний сталей в агрессивных средах.
32. Неметаллические защитные покрытия. Лакокрасочные покрытия.
33. Общие понятия о надежности и долговечности строительных конструкций.
34. Способы увеличения надежности и повышения долговечности конструкций каркаса зданий.
35. Особенности эксплуатации конструкций зданий и сооружений.
36. Дефекты и повреждения стальных конструкций. Общая характеристика.
37. Повреждения конструкций покрытия. Причины образования влияние на долговечность.
38. Повреждения колонн. . Причины образования влияние на долговечность.
39. Повреждения подкрановых конструкций. . Причины образования влияние на долговечность.
40. Повреждения прочих конструкций. . Причины образования влияние на долговечность.
41. Химическая коррозия металлов.
42. Виды химической коррозии. Термодинамика химической коррозии.
43. Кинетика химической коррозии.
44. Влияние различных факторов на скорость высокотемпературной коррозии.
45. Электрохимическая коррозия металлов.
46. Механизм протекания электрохимической коррозии.
47. Двойной электрический слой и электродные потенциалы металлов.
48. Виды электродов. Термодинамика электрохимической коррозии металлов.
49. Кинетика электрохимической коррозии.
50. Нахождение наиболее удачных конструктивных решений. Общая компоновка и расположение элементов.
51. Влияние конструктивной формы элементов на коррозию.
52. Удачные и неудачные конструктивные решения металлических конструкций.
53. Влияние коррозионных повреждений на прочность металлов.

54. Методы лабораторных коррозионных испытаний сталей в агрессивных средах
55. Учет требований долговечности при проектировании металлических конструкций.
56. Принцип концентрации металла.
57. Рациональный подбор сплавов металлоконструкций. Оценка равномерности коррозионного износа.
58. Определение минимальной температуры эксплуатации конструкций.
59. Методы защиты от коррозии.
60. Выбор систем защитных покрытий.
61. Легирование металлических материалов.
62. Электрохимическая защита.
63. Неметаллические защитные покрытия. Лакокрасочные покрытия.
64. Протекторная защита металлических конструкций.
65. Методы коррозионных испытаний. Классификация методов, Лабораторные методы. Полевые и натурные испытания.
66. Неразрушающие методы исследования металлических строительных изделий и конструкций.
67. Ультразвуковой, радиографический визуально измерительный контроль.
68. Основные виды коррозии в строительстве: атмосферная коррозия, почвенная коррозия, коррозия блуждающими токами.

Задачи

1. 2 вида металлов корродируют в морской воде со скоростью 0,15г/(м2/сут). Определите скорость коррозии в мм/год. Плотность алюминия 2,7 г/см3 , хрома 7,19 2,7 г/см3 .
2. В результате 20-летних испытаний образца металла оказалось, что средняя скорость их атмосферной коррозии составила 0,037 мм/год для городской промышленной атмосферы и 0,0020 мм/год для сельской атмосферы. Рассчитайте скорость коррозии в г/(м2сут.).
3. Определить термодинамическую возможность коррозии железа при температурах 273К, 293К, 313К, 333К, 353К, 373К. Продуктом коррозии является Fe2O3.
4. Деталь сделана из сплава, в состав которого входит магний и марганец. Какой из компонентов сплава будет разрушаться при электрохимической коррозии. Ответ подтвердите уравнениями анодного и катодного процесса коррозии: а) в кислой среде; б) в кислой среде, насыщенной кислородом. Будет ли оксидная пленка, образующаяся на олове, обладать защитными свойствами.
5. Протекторная защита металлических конструкций. Оценить защитные свойства оксидной пленки данного металла: Металл – Fe; Оксид металла – Fe2O3.

6. Оценить коррозионную стойкость алюминия в серной кислоте, если убыль массы алюминиевой пластины плотностью ρ = 2,7 г/см3, размером 70х20х10 мм составила после 8 суток испытания 0,0348 г.
7. Определить критическую температуру эксплуатации конструкции если марка стали Ст3, критическая температура эксплуатации стандартных образцов -50 оС, температура коррозионного износа -25 оС. Влияние технологических факторов пренебречь.
8. Оценить коррозионную стойкость узла конструкции если известно что: узел состоит из 3-х элементов составного сечения, с толщиной стенки 7 мм соединённых под углами 0, 45, 90 градусов. Скорость коррозии стали марки Ст3 принять 0,1 мм/год.
9. Определить глубину коррозионного износа конструкции через 50 лет, если через год после эксплуатации массовый показатель износа составил 0,01 г/(м2сут)
10. Выбрать тип и рассчитать срок службы лакокрасочного покрытия металлического изделия из сплава Ст3 с пескоструйной очисткой для кислой агрессивной среды.
11. Условия выбора сплавов для металлоконструкций в зависимости от типа сооружения, срока службы и агрессивности эксплуатационной среды.
12. Определить минимальную толщину стенки элементов конструкции химического предприятия при эксплуатации конструкции в средне агрессивной среде. Сталь Ст3 срок службы 40 лет.