

УДК 620.193

Комплексный подход к выбору материалов, эксплуатируемых в условиях коррозивных сред

К. Р. Таранцева¹, В. С. Пахомов²

¹ Пензенская государственная технологическая академия

² Московский государственный университет инженерной экологии

E-mail: kr@pgta.ac.ru

Статья поступила в редакцию 02.02.2009.

Рассмотрен комплексный подход к выбору конструкционных материалов, эксплуатируемых в условиях коррозионного воздействия сред. Предложены различные подходы к выбору таких материалов: первый в условиях достаточной информации и хорошо проверенных ситуаций, второй — в условиях недостаточной информации и непроверенных ситуаций.

Для обеспечения длительной и надежной работы изделий в конкретных условиях эксплуатации конструкционные материалы должны обладать комплексом определенных свойств (долговечностью, надежностью, конструктивной прочностью и др.). В настоящее время для обеспечения заданной долговечности аппаратов, эксплуатируемых в условиях воздействия коррозионно-активных сред, к их расчетным конструктивным размерам делают прибавку на коррозию или предусматривают защитные покрытия. Величина этой прибавки часто является неоптимальной из-за отсутствия методов расчета надежности аппаратов в условиях их поверхностного разрушения. Это приводит либо к преждевременным отказам аппаратов, либо к нерациональному расходу конструкционных материалов [1, 2].

При оценке надежности изделий в соответствии с ГОСТ 27.003—83 определяют критерии их отказов и предельных состояний [3, 4]. Расчет ожидаемого среднего $\bar{\tau}$ и гамма-процентного τ_γ ресурса (срока службы) оборудования производят по величине предельно допустимой глубине коррозии $h_{\text{п}}$ и средней скорости коррозии $\xi_{\text{ср}}$ [2]:

$$\bar{\tau} = \left(1 + \frac{v_\tau^2}{2}\right) \xi_{\text{ср}}^{-1} h_{\text{п}}; \quad (1)$$

$$\tau_\gamma = \left(1 + \frac{u_\gamma^2 v_\tau^2}{2} - \frac{v_\gamma v_\tau}{2} \sqrt{4 + u_\gamma^2 v_\tau^2}\right) \xi_{\text{ср}}^{-1} h_{\text{п}}, \quad (2)$$

где $v_\tau = v(\Delta\tau \xi_{\text{ср}}/h_{\text{п}})$ — коэффициент вариации ресурса; u_γ — квантиль нормального распределения, соответствующая вероятности γ ($u_{0,8} = 0,842$; $u_{0,9} = 1,282$; $u_{0,95} = 1,645$).

При конструировании изделий и определении величины прибавки на коррозию необходимо также оценивать величину дисперсии основных технологических параметров среды (температуры, концентрации агрессивных компонентов) и рассчитывать ожидаемую скорость коррозии с учетом возможных отклонений параметров. Учет дисперсии технологических параметров при разработке нового оборудования позволит более обоснованно определять величину прибавки на коррозию и тем самым исключить нерациональный расход металла или преждевременный выход из строя оборудования.

Реакционное и вспомогательное оборудование химико-фармацевтических производств эксплуатируется в сложных условиях механического нагружения и коррозионно-эрозионного воздействия. Долговечность его в этом случае может быть определена как [1—4]:

$$\frac{1}{\tau_\Sigma} = \frac{1}{\tau} + \frac{1}{\tau_{\text{кор}}}, \quad (3)$$

где τ_Σ — суммарная долговечность изделия;

$\tau = \tau_0 \exp \frac{U_0 - \gamma\sigma}{kT}$ — долговечность изделия, определяемая приложенной нагрузкой; $\tau_{\text{кор}}$ — долговечность, определяемая действием агрессивной среды; U_0 — энергия активации разрушения; τ_0 — постоянная, равная 10^{-13} с; γ — структурный коэффициент; σ — нагрузка; k — постоянная Больцмана; T — температура изделия.

Изменение коэффициента γ под воздействием агрессивной среды можно оценить по формуле [2]:

$$\left(\tau_0 \exp \frac{U_0 - \gamma_\Sigma \sigma}{kT}\right)^{-1} = \left(\tau_0 \exp \frac{U_0 - \gamma \sigma}{kT}\right)^{-1} + \left(\tau_0 \exp \frac{U_0 - \gamma_{\text{кор}} \sigma}{kT}\right)^{-1}, \quad (4)$$

приведя уравнение к виду:

$$\exp \frac{\sigma(\gamma_\Sigma - \gamma_{\text{кор}})}{kT} = \exp \frac{\sigma(\gamma - \gamma_{\text{кор}})}{kT} + 1, \quad (5)$$

где γ_{Σ} — структурный коэффициент, определяемый приложенной нагрузкой и действием агрессивной среды; $\gamma_{кор}$ — коэффициент, определяемый только действием агрессивной среды.

Для (5) возможны три случая:

1) $\gamma \gg \gamma_{кор}$, когда разрушение определяется приложенной нагрузкой, при этом

$$\frac{\sigma}{kT}(\gamma_{\Sigma} - \gamma_{кор}) = \frac{\sigma}{kT}(\gamma - \gamma_{кор}); \quad \gamma_{\Sigma} \approx \gamma; \quad (6)$$

2) $\gamma \ll \gamma_{кор}$, когда разрушение определяется действием агрессивной среды, а влиянием механической нагрузки можно пренебречь, при этом:

$$\gamma_{\Sigma} = \gamma_{кор}; \quad (7)$$

3) $\gamma \approx \gamma_{кор}$, когда влияние механической нагрузки и агрессивной среды на долговечность конструкции примерно одинаково, это наиболее распространенный случай.

Для последнего случая из (3) следует:

$$\exp \frac{\sigma(\gamma_{\Sigma} - \gamma)}{kT} = 2 \quad (8)$$

или

$$\gamma_{\Sigma} = \gamma + \frac{kT \ln 2}{\sigma},$$

т. е. коэффициент γ для конструкционного материала при воздействии на него агрессивной среды увеличивается:

$$\Delta\gamma = \frac{kT \ln 2}{\sigma}, \quad (9)$$

а долговечность уменьшается:

$$\gamma_{\Sigma} = 0,5\tau_0 \exp \frac{U_0 - \gamma\sigma}{kT}. \quad (10)$$

Таким образом, при сопоставимом влиянии на процесс разрушения механической нагрузки и агрессивной среды долговечность изделия уменьшается вдвое.

Конструкционная прочность изделий зависит, прежде всего, от качества материала, выбранного конструктором, их конструктивных особенностей, технологии изготовления и условий эксплуатации. Выбор конструкционного материала и создание надежных долговечных конструкций, эксплуатируемых в агрессивных средах, является сложной задачей. В решении ее, при разработке технического проекта, принимает участие большое число специалистов: конструктор, специалист по коррозии, технолог, экономист и др., между которыми часто возникают трудности достижения разумного компромисса.

Конструктор при проектировании изделия в первую очередь руководствуется ее функциональным назначением, т. е. стремится создать надежную конструкцию, обеспечивающую заданные условия протекания технологических процессов,

например, необходимые поверхности тепло- и массообмена, требуемые гидродинамические условия и пр. Для этого он, с учетом условий работы конструкции, выбирает конструкционный материал, обеспечивающий заданные нагрузки, и назначает способ изготовления изделия или конструкции с учетом технологических свойств выбранного материала. Учет коррозии часто производится формально путем введения припуска на коррозию.

Специалисты по коррозии часто склонны превышать требования к коррозионной стойкости материалов, предлагая материалы с заведомо высокой коррозионной стойкостью, имеющие соответственно более высокую стоимость и не всегда обладающие необходимыми технологическими и механическими свойствами. Однако наилучший с точки зрения защиты от коррозии вариант в некоторых случаях может оказаться наименее выгодным с точки зрения экономики и привести к отказу заказчика от проекта. Поэтому выбор оптимального решения не может базироваться только на понимании и знании технологии защиты от коррозии, необходимо также знать и допустимую величину издержек проекта защиты. Компромисс в данном случае может быть найден в обеспечении безопасности объекта и экономически оправданном сроке его службы, при этом коррозионная стойкость материала может служить индикатором рациональности системы.

Причиной различного подхода к выбору конструкционных материалов конструктора и специалиста по коррозии является их разный взгляд на одну и ту же проблему (рис. 1).

Конструктор из всех свойств материала отдает предпочтение механическим и технологическим



Рис. 1. Подход конструктора и коррозиониста к выбору конструкционных материалов



Рис. 2. Коррозионная стойкость как динамическая характеристика материала [5]

свойствам. Он редко является специалистом в области материаловедения, поэтому не задумывается о том, что изменения в поверхностном слое конструкционного материала, вызванные коррозией, могут приводить к изменению его механических свойств.

Коррозионист оценивает главным образом явления, происходящие в поверхностном слое металла, рассматривая, таким образом, из всех свойств, присущих конструкционному материалу, физические, химические и эксплуатационные. При этом он не всегда задается целью проанализировать всю цепочку металлургических и технологических превращений материала в готовое изделие, определяющих, в том числе, его химическое сопротивление.

Между тем химическое сопротивление материала или коррозионная стойкость являются динамической характеристикой материала, определяемой не только самим материалом, коррозионной средой, условиями эксплуатации, но и конструктивными особенностями изделия (рис. 2) [5].

Таким образом, анализ факторов, влияющих на надежность конструкции, показывает, что существует тесная взаимосвязь между различными свойствами материала, поэтому для корректного выбора конструкционных материалов необходимо учитывать весь комплекс свойств [6–10].

Характеристики механических свойств материала (временное сопротивление, предел текучести, ударная вязкость, твердость, относительное удлинение, относительное сужение и т. д.) необходимы конструктору при расчете размеров конструкции по условиям ее нагружения и, соответственно, при выборе материала. Именно эти характеристики входят в расчетные формулы и, в конечном счете, предопределяют выбор конструкционного материала.

В свою очередь, механические свойства материалов определяются способом формообразования изделия и видом термической обработки. Способы формообразования (обработка давлением, резание, сварка, литье и др.) влияют, а в ряде случаев и формируют внутреннюю и внешнюю структуру, и соответственно, свойства изделия. Термообработка окончательно формирует структуру материала и определяет его свойства.

Знание технологических свойств (свариваемость, штампуемость, обрабатываемость резанием, литейные свойства) позволит конструктору выбрать оптимальные способы формообразования изделия, повысить тем самым надежность изделия и снизить стоимость его изготовления.

Наконец, знание условий эксплуатации и характеристик среды позволит конструктору корректно выбрать материал с требуемыми механическими, технологическими и эксплуатационными свойствами для конкретных условий эксплуатации и повысить долговечность конструкции.

Однако если информация по механическим и технологическим свойствам большинства конструкционных материалов достаточно широко представлена соответствующими ГОСТами и ОСТами и вполне доступна, то данные по эксплуатационным свойствам, в частности, коррозионной стойкости материалов, ограничены, кроме того, они обладают низкой информативностью.

В связи с этим при расчете долговечности или срока службы изделия, определяемого коррозионной стойкостью материала, конструктор или коррозионист может столкнуться с двумя различными ситуациями выбора материала:

- условия достаточной информации и хорошо проверенных ситуаций;
- условия недостаточной информации и непроверенных ситуаций.

Алгоритм принятия решения и получения необходимой информации в этих случаях будет разным (рис. 3).

В первом случае, на основе имеющихся в базе данных и базе знаний результатов проводится регрессионный анализ, определяются доминирую-



Рис. 3. Алгоритм получения необходимой информации

щие факторы и далее путем экстраполяции определяется глубина коррозионных повреждений и прогнозируется срок эксплуатации конструкции. Точность прогноза в этом случае в значительной мере зависит от корректности применяемых методов измерения и обработки.

Во втором случае, т. е. для непроверенных ситуаций, выходящих за рамки применимости имеющихся данных, необходимо физическое и математическое моделирование или экспертный анализ. Результаты физического и математического моделирования должны быть сравнены с данными промышленных испытаний, что позволит повысить достоверность прогнозов. Достоверность экспертной оценки зависит в первую очередь от профессионализма экспертов.

После выбора необходимого материала и способов его формообразования необходимо провести технико-экономический анализ предлагаемого конструкторского решения. Суть его заключается в том, чтобы путем комплексной оценки свойств конструкционного материала из нескольких вариантов выбрать один, оптимальный по своим свойствам и стоимости.

**Практические рекомендации
по выбору конструкционных материалов,
эксплуатируемых в условиях
коррозионного воздействия сред**

В условиях имеющегося предварительного опыта эксплуатации выбор коррозионно-стойких материалов целесообразно проводить по методу прецедентов, т. е. выбирать стали из тех, которые наилучшим образом зарекомендовали себя в подобных условиях, а затем на основании комплексной оценки их свойств выбрать оптимальные.

В случае, если необходимо расширить номенклатуру используемых материалов и выбрать новый материал, не проверенный в рассматриваемой ситуации, или же для вновь разрабатываемых производств, рекомендуется следующий подход:

1. Осуществить предварительный выбор материалов на основании имеющихся справочных данных и рекомендаций экспертов.
2. Выбрать корректные лабораторные и промышленные методики испытания коррозионной стойкости материалов.
3. Выявить влияние внешних и внутренних факторов коррозионной системы на химическое сопротивление материалов. Определить оптимальные условия проведения технологических процессов и безопасные режимы эксплуатации конструируемого оборудования.
4. На основании лабораторных данных, полученных в результате полного факторного эксперимента, спрогнозировать скорость коррозии исследуемого материала как функцию нескольких переменных. Определить доверительные границы, математическое ожидание, дисперсию и корреляционную функцию случайной величины.

5. По результатам промышленных испытаний найти функцию, описывающую зависимость скорости коррозионного повреждения от времени, параметров технологического процесса и т. д.

6. Сопоставить результаты лабораторных испытаний с промышленными и установить корреляция между маркой материала, условиями протекания технологического процесса по регламенту, глубиной коррозионных повреждений.

7. При невозможности проведения промышленных и лабораторных испытаний определить максимальную глубину коррозионных повреждений на исследуемых материалах методом математического моделирования.

8. Спрогнозировать глубину коррозионных повреждений на заданный срок службы аппарата и определить величину коррозионной прибавки. В качестве критерия при выборе экстраполирующей функции можно использовать общую допускаемую ошибку, складывающуюся из ошибки, возникающей при описании экспериментальных данных конкретной функцией, и ошибки вычисления.

9. Проанализировать технологические методы и способы изготовления аппарата, провести оценку экономичности проекта и на основании этого определить оптимальные режимы и способы изготовления оборудования из рекомендованных конструкционных материалов.

10. Провести поиск наиболее оптимальных технологических параметров эксплуатации оборудования и исходя из этого расчет поверхности массо- и теплообмена оборудования, предназначенного для осуществления технологического процесса.

11. Выполнить конструкционный расчет аппарата с учетом рассчитанной прибавки на коррозию и заданных сроков эксплуатации оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маннапов Р. Г. Оценка надежности аппарата в условиях поверхностного разрушения технологическими средами // Хим. и нефт. машиностроение. 1987. № 5. С. 11—29.
2. Нескоромный Л. Д., Дониц А. Р., Романенко О. А. Оценка долговечности трубопроводов, работающих в агрессивных средах // Нефт. и газ. пром-сть. 1988. № 3. С. 40—42.
3. РД 26-10—87. Методические указания. Оценка надежности химического и нефтяного оборудования при поверхностном разрушении. М.: НИИХиммаш, 1987. 31 с.
4. РД 25-11-21—88. Методические указания. Надежность изделий химического и нефтяного машиностроения. Система контроля и оценки надежности машин в эксплуатации. Оценка надежности изделий по результатам эксплуатационных наблюдений (испытаний). М.: НИИХиммаш, 1988. 122 с.
5. Kelly G. J. Corrosion expert's expertise and expert systems // Corrosion. 1987. V. 12. N 1. P. 5—10.
6. Рыжаков В. В., Таранцева К. Р., Пятирублевый Л. Г. Основы выбора конструкционных материалов. Пенза: Изд-во ЦНТИ, 1998. 149 с.
7. Ветопский А. Г., Таранцева К. Р. Надежность и техногенный риск. Пенза: Изд-во ПТУ, 2003. 176 с.
8. Таранцева К. Р., Пахомов В. С. Питтинговая коррозия сталей. Теория и практика защиты. Пенза: Изд-во ПГТА, 2006. 145 с.
9. Таранцева К. Р., Пахомов В. С. Автоматизированная система выбора коррозионно-стойких материалов в химико-фармацевтических производствах // Коррозия: материалы, защита. 2004. № 7. С. 18—22.
10. Таранцева К. Р., Пахомов В. С. Использование современных информационных технологий для решения коррозионных проблем // Коррозия: материалы, защита. 2004. № 6. С. 8—12.