

ЧАСТЬ I

КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ
МАШИНОСТРОЕНИИ

ГЛАВА 1

ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К КОНСТРУКЦИОННЫМ МАТЕРИАЛАМ
ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

Специфические условия работы технологической аппаратуры, характеризуемые диапазоном давлений от глубокого разрежения (вакуума) до избыточных давлений порядка 250 МПа и выше, большим интервалом рабочих температур от -254 до $+1000$ °С и выше при агрессивном воздействии среды, предъявляют высокие требования к выбору конструкционных материалов проектируемой аппаратуры.

Наряду с обычными требованиями высокой коррозионной стойкости в определенных агрессивных средах к конструкционным материалам, применяемым в технологическом аппаратостроении, одновременно предъявляются также требования высокой механической прочности, жаростойкости и жаропрочности, сохранения удовлетворительных пластических свойств при высоких и низких температурах, устойчивости при знакопеременных или повторных однозначных нагрузках (циклической прочности), малой склонности к старению и др.

В расчетах на прочность технологической аппаратуры конструктору часто приходится учитывать общую равномерную по поверхности коррозию металлов и сплавов, для чего необходимо знать проникаемость материала в мм/год при заданных рабочих условиях агрессивной среды (концентрация, температура, давление). Она учитывается при выборе величины прибавки на коррозию к рассчитанной толщине стенки аппарата. В ряде случаев при конструировании технологической аппаратуры необходимо учитывать также и другие виды коррозионного разрушения материалов. Например, в химических аппаратах, выполненных из кислотостойкой стали и находящихся под постоянным повышенным давлением, при совместном действии коррозионной среды и растягивающих напряжений в ряде случаев наблюдается коррозионное растрескивание металла, происходящее обычно внезапно без видимых изменений материала. Это явление не имеет места при наличии в металле напряжений сжатия. Кроме того, коррозионное растрескивание происходит в небольшом количестве агрессивных сред и зависит от величины давления и температуры. Известно, что ускоренное растрескивание аппаратуры из кислотостойких сталей, находящейся под постоянно действующей нагрузкой, имеет место в растворах NaCl , MgCl_2 , ZnCl_2 , LiCl , H_2S , морской воде и т.д. Латунь обнаруживают склонность к коррозионному растрескиванию в среде аммиака.

Для технологической аппаратуры химических и

нефтехимических производств преимущественно применяются конструкционные материалы, стойкие и весьма стойкие в агрессивных средах. Материалы пониженной стойкости применяются в исключительных случаях, когда доказана целесообразность использования их вместо стойких, но более дорогих и дефицитных материалов.

При выборе материалов для аппаратов, работающих под давлением при низких и высоких температурах, необходимо учитывать, что механические свойства материалов существенно изменяются в зависимости от температуры. Как правило, прочностные свойства металлов и сплавов повышаются при низких температурах и понижаются при высоких.

При статическом приложении нагрузки важными характеристиками для оценки прочности материала являются предел текучести σ_y (или условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ или $\sigma_{1,0}$) и предел прочности σ_B . Упругие свойства металлов характеризуются значениями модуля упругости E и коэффициентом Пуассона μ .

Указанные характеристики являются основными при расчетах на прочность деталей аппаратуры, работающей под давлением при низких (от -40 до -254 °С), средних (от $+200$ до -40 °С) и высоких (выше $+200$ °С) температурах.

Для работы при низких температурах по нормам Госгортехнадзора следует выбирать металлы, у которых порог хладоломкости лежит ниже заданной рабочей температуры. Однако в химической промышленности на протяжении многих лет безаварийно эксплуатируется при рабочих температурах до -40 °С большое количество аппаратов, трубопроводов, арматуры, насосов и другого оборудования, изготовленных из углеродистой стали обыкновенного качества и из серого или ковкого чугуна, т.е. из материалов, имеющих ударную вязкость KCU при указанной температуре менее 2 Дж/см².

Поэтому при выборе металла для работы при низких температурах следует исходить не только из величины ударной вязкости, но также учитывать величину и характер приложенной нагрузки (статическая, динамическая, пульсирующая), наличие и характер концентраторов напряжений и чувствительность металла к надрезам, начальные напряжения в конструкции, способ охлаждения металла (за счет содержащегося в аппарате хладонотителя или за счет окружающей среды).

При статическом приложении нагрузки в ряде случаев допускается изготовление аппаратов из ме-

таллов, приобретающих хрупкость при пониженных рабочих температурах, но не имеющих дефектов, нарушающих однородность структуры и способствующих концентрации напряжений. Технология изготовления аппаратов из таких материалов должна исключать возможность возникновения высоких начальных напряжений в конструкции. К таким аппаратам можно отнести свободно опирающиеся емкости для жидких и газообразных продуктов, содержащихся в них под небольшим избыточным давлением, металлоконструкции неответственного назначения и др.

При динамическом приложении нагрузки, кроме указанных выше характеристик, необходимо учитывать также и величину ударной вязкости a_u . Для многих углеродистых и легированных сталей ударная вязкость при низких температурах (обычно ниже -10°C) резко понижается, что исключает применение этих материалов в таких условиях. Ударная вязкость для большинства цветных металлов и сплавов (медь и ее сплавы, алюминий и его сплавы, никель и его сплавы), а также хромоникелевых сталей аустенитного класса при низких температурах, как правило, уменьшается незначительно и пластические свойства этих материалов сохраняются на достаточно высоком уровне, что и позволяет применять их при рабочих температурах порядка до -254°C .

Для оборудования, подверженного ударным или пульсирующим нагрузкам и предназначенного для работы при низких температурах, следует применять металлы и сплавы с ударной вязкостью КСУ не ниже 3 Дж/см^2 при рабочих температурах. Для деталей, имеющих концентраторы напряжений (болты, шпильки), рекомендуются материалы, у которых при рабочей температуре величина ударной вязкости КСУ не менее 4 Дж/см^2 .

При высокой температуре наблюдается значительное снижение основных показателей, характеризующих прочностные свойства металлов и сплавов. Кроме того, поведение металлов под нагрузкой при высоких температурах резко отличается от их поведения при нормальной температуре внутри производственных помещений. Предел прочности σ_B и предел текучести σ_T зависят от времени пребывания под нагрузкой и скорости нагружения, так как с повышением температуры металл из упругого состояния переходит в упругопластическое и под нагрузкой непрерывно деформируется (явление ползучести). Температуры, при которых начинается ползучесть, у разных металлов различны. Для углеродистых сталей обыкновенного качества ползучесть наступает уже при температурах выше 375°C , для низколегированных сталей — при температурах выше 525°C , для жаропрочных — при еще более высоких температурах.

С увеличением времени пребывания металла под нагрузкой характеристики прочности уменьшаются тем значительнее, чем выше температура эксплуатации оборудования. Поэтому при расчете на прочность аппаратов, работающих длительное время при высоких температурах, допускаемые напряжения определяют по от-

ношению к условному пределу ползучести $\sigma_{пл}$ или по пределу длительной прочности $\sigma_{дл}$. Для химической аппаратуры допускаемая скорость ползучести принимается $\leq 10^{-7} \text{ мм/мм}\cdot\text{ч}$ ($10^{-5} \%$ в год), для крепежных деталей — $\leq 10^{-9} \text{ мм/мм}\cdot\text{ч}$ ($10^{-7} \%$ в год).

Понижение механических свойств при высоких температурах обусловлено происходящими в металлах структурными и фазовыми превращениями. К структурным изменениям такого рода можно отнести явление графитизации углеродистой и молибденовой сталей, образование ферритной фазы в хромоникелевых сталях и др., присущие последним при длительной работе металла в условиях высокой температуры. В ряде случаев стабильность структуры стали в течение длительного срока службы оборудования удается обеспечить путем термической обработки стали. В большинстве случаев для аппаратуры, предназначенной для работы при высоких температурах, применяются специальные марки жаропрочных сталей, характеризующиеся достаточной механической прочностью и стабильностью структуры при высоких температурах. Наряду с жаропрочностью эти металлы должны обладать жаростойкостью, т. е. способностью противостоять коррозионному воздействию среды в условиях длительной работы материала при высоких температурах. При непрерывном процессе окисления рабочего сечения металла уменьшается, что приводит к повышению рабочего напряжения и ухудшению условий безопасной эксплуатации оборудования.

Некоторые детали аппаратуры (болты, шпильки, пружины и др.) вследствие повышения пластичности металла при высоких температурах работают в условиях постепенного снижения напряжений, вызванных первоначально приложенной нагрузкой (затягом), при сохранении геометрических размеров (явление релаксации напряжений). Расчет таких деталей следует производить на предварительную нагрузку (затяг), обеспечивающую на заданный период времени остаточную нагрузку, необходимую для нормальной работы конструкции.

При выборе конструкционных материалов для технологической аппаратуры необходимо также учитывать физические свойства материалов (теплопроводность, линейное температурное расширение), а также некоторые другие соображения технико-экономического порядка, такие, как технология изготовления аппаратуры, дефицитность и стоимость материала, наличие стандарта или утвержденных технических условий на его поставку, освоенность материала промышленностью и др.

Создаваемая конструкция технологической аппаратуры должна быть не только технически совершенной, отвечающей всем требованиям современного уровня машиностроения, но и технологичной в изготовлении, экономичной. Так как стоимость изделия в значительной мере определяется стоимостью примененных для его изготовления материалов, то при всех прочих равных условиях предпочтение должно быть отдано более дешевым и менее дефицитным материалам.

В технологическом аппаратостроении основным способом выполнения металлических неразъемных соединений является сварка и в ряде случаев пайка. Хорошая свариваемость металлов является одним из основных и необходимых условий, определяющих пригодность материала для создаваемой конструкции. Необходимо также стремиться к максимально возможному, без ущерба для конструкции, сокращению номенклатуры применяемых марок материалов и типоразмеров.

Аппаратуру не рекомендуется изготавливать целиком из дорогостоящих и дефицитных материалов. Технико-экономическая нецелесообразность применения монолитных толстолистовых высоколегированных сталей и цветных металлов не вызывает сомнения. Коррозии обычно подвержена лишь внутренняя поверхность аппаратов. Для обеспечения амортизационного срока службы аппарата достаточен слой коррозионностойкого металла толщиной в несколько миллиметров. Таким образом, представляется целесообразным изготавливать аппаратуру для активных коррозионных сред из двухслойного проката, облицовочный слой которого может быть выполнен из требуемого коррозионностойкого металла или сплава. Например, вместо монолитной толстолистовой нержавеющей стали 12Х18Н10Т или 10Х17Н13М2Т целесообразно применять двухслойную листовую сталь 16ГС + 12Х18Н10Т или Ст3сп5 + 10Х17Н13М2Т.

В настоящее время металлургической промышленностью освоен ряд новых марок высоколегированных сталей с малым содержанием никеля, которые и рекомендуется применять в технологическом аппаратостроении в качестве заменителей дефицитных хромоникелевых сталей или сталей с большим содержанием никеля. К таким сталям относятся 08Х22Н6Т, 08Х21Н6М2Т и др.

Для активных коррозионных сред наиболее целесообразно изготовление технологической аппаратуры из неметаллических материалов: природных кислотоупоров, керамики, фарфора, стекла, углеграфитовых материалов, пластических масс (фаолита, полиэтилена, винилпласта и др.) или из углеродистой стали, покрытой кислотостойкими эмалями, резиной или пластмассами (для соответствующих сред, давления и температуры).

В последнее время в конструировании технологической аппаратуры все большее применение находят композиционные материалы, которые по механической

прочности превосходят даже качественные стали, а по коррозионной стойкости не уступают керамике, стеклу и эмалям.

Таким образом, при конструировании технологической аппаратуры к конструкционным материалам должны предъявлять следующие требования:

1) достаточная общая химическая и коррозионная стойкость материала в агрессивной среде с заданными концентрацией, температурой и давлением, при которых осуществляется технологический процесс, а также стойкость против других возможных видов коррозионного разрушения (межкристаллитная коррозия, электрохимическая коррозия сопряженных металлов в электролитах, коррозия под напряжением и др.);

2) достаточная механическая прочность при заданных давлении и температуре технологического процесса, с учетом специфических требований, предъявляемых при испытании аппаратов на прочность, герметичность и т. п. и в эксплуатационных условиях при действии на аппараты различного рода дополнительных нагрузок (ветровая нагрузка, прогиб от собственного веса и т. д.);

3) наилучшая способность материала свариваться с обеспечением высоких механических свойств сварных соединений и коррозионной стойкости их в агрессивной среде, обрабатываться резанием, давлением, подвергаться сгибу и т. п.;

4) низкая стоимость материала, недефицитность и освоенность его промышленностью. Необходимо стремиться применять двухслойные стали, неметаллические материалы, стали с покрытиями из неметаллических материалов. Номенклатура применяемых материалов как по наименованию, маркам, так и по сортаменту должна быть минимальной с учетом ограничений, предусматриваемых ведомственными нормами и действующими на заводах-изготовителях инструкциями;

5) качество, химический состав и механические свойства материалов и полуфабрикатов должны удовлетворять требованиям соответствующих стандартов и ТУ и быть подтверждены сертификатами заводов-поставщиков. При отсутствии сертификатов все необходимые испытания должны быть проведены на заводе-изготовителе аппарата;

6) возможность простой утилизации при выработке сроков эксплуатации оборудования, узлов и деталей