

ся и после сварки не требуется термическая обработка соединений. Более прочные, но менее пластичные сплавы ВТЗ-1 и ВТ6 применяют при температурах до -196°C . Эти сплавы свариваются хуже, чем однофазные, и для их сварных соединений необходим отжиг.

Медь и ее сплавы пластичны, не имеют порога хладноломкости. Кроме того, вязкость разрушения у них при охлаждении повышается. Их применяют для трубных конструкций, крепежных деталей, сварных корпусов, работающих при температурах до -269°C . Из-за более высокой стоимости по сравнению с алюминием медь и ее сплавы все больше заменяют сплавами алюминия.

3.1.4. Неметаллические хладостойкие материалы

Неметаллические хладостойкие материалы имеют более низкую прочность и ударную вязкость по сравнению с металлами. Их используют для изготовления тепловой изоляции, а также отдельных деталей и элементов конструкций. Для тепловой изоляции применяют вспененные полистирол или полиуретан, отличающиеся особенно низкой теплопроводностью ($\lambda = 0,3\text{--}0,05 \text{ Вт/(м}\cdot^{\circ}\text{C)}$). Для деталей и элементов конструкций используют пластмассы, наполненные стеклянным волокном (полиамиды П-68, поликарбонаты), а для подвижных уплотнений и электроизоляции – фторопласт-3 и 4 (до -269°C) и специальные резины ИРП, В и Г (ИРП-1321, ИРП-1346, В-14-1 и др.), применяемые в амортизаторах, уплотнениях, прокладках, манжетах тормозов и пальцев, работающих в масле до -70°C .

3.2. Жаропрочные сплавы

Жаропрочностью называется способность материала длительное время сопротивляться деформированию и разрушению при повышенных температурах. Жаропрочность важна при выборе материала, когда рабочие температуры деталей превышают $0,3 T_{\text{пл}}$.

Критерии жаропрочности материалов: рабочая температура; длительность работы под нагрузкой; величина напряжений.

При длительном нагружении при высоких температурах поведение материала определяется диффузионными процессами. Для этих условий характерны процессы *ползучести и релаксации напряжений*.

Ползучесть представляет собой медленное нарастание пластической деформации под действием напряжений, меньших предела те-

кучести. Аналогично влияет повышение напряжения при неизменной температуре испытания.

Предел текучести, определяемый при кратковременных испытаниях, не может быть критерием жаропрочности, так как он не учитывает поведение материала при длительном нагружении.

Критериями жаропрочности являются *предел ползучести и предел длительной прочности.*

Пределом ползучести называется напряжение, под действием которого материал деформируется на определённую величину за определённое время при заданной температуре. **Например:** $\sigma_{1/100000}^{550} = 100$ МПа означает, что под действием напряжения 100 МПа за 100000 ч при температуре 550°C в материале появится пластическая деформация 1%.

Пределом длительной прочности называют напряжение, которое вызывает разрушение материала при заданной температуре за определённое время. В обозначении предела длительной прочности указывают температуру и время до разрушения. **Например:** $\sigma_{10000}^{600} = 130$ МПа означает, что при температуре 600°C материал выдержит действие напряжения 130 МПа в течение 10000 ч.

Предел длительной прочности всегда меньше предела прочности, определяемого при кратковременных испытаниях при той же температуре.

Когда между перемещением дислокаций, зернограницным скольжением и диффузионным переносом нет соответствия, на границах зёрен появляются поры и быстро наступает разрушение.

Для обеспечения жаропрочности требуется ограничить подвижность дислокаций и замедлить диффузию. Это достигается повышением прочности межатомных связей, созданием препятствий для перемещения дислокаций внутри зёрен и на их границах, увеличением размеров зёрен.

Основной путь повышения жаропрочности – создание в материалах крупнозернистой структуры с однородным распределением мелких частиц упрочняющих фаз внутри зёрен и на их границах. Это получается при помощи *закалки и отпуска*, а во многих жаропрочных сплавах – *после закалки и старения*. Для получения оптимальной структуры в жаропрочных сталях и сплавах используют комплексное легирование, и по химическому составу эти материалы сложнее обычных легированных сталей и сплавов.

Дополнительные меры повышения жаропрочности:

- *термомеханическая обработка;*
- *увеличение прочности межатомной связи в сталях, когда благодаря легированию ОЦК-решётка заменяется ГЦК-решёткой;*
- *создание анизотропной структуры.*

3.2.1. Основные группы жаропрочных материалов

Перлитные, мартенситные, аустенитные жаропрочные стали используют при температуре 450–700°C и по масштабам применения занимают ведущее место. Ниже 450°C вполне пригодны обычные конструкционные стали и нет необходимости заменять их жаропрочными сталями.

Жаропрочные сплавы на основе *алюминия, магния, титана* легче сталей, однако они менее жаропрочны и используются при следующих температурах:

- 1) сплавы алюминия – до 500–550°C;
- 2) сплавы магния – до 300–350°C;
- 3) сплавы титана – до 500–600°C.

Указанные сплавы, несмотря на более высокую стоимость, применяют там, где из-за повышенных эксплуатационных температур невозможно использовать обычные сплавы этих металлов и нельзя применить стали из-за более высокой плотности.

Сплавы на основе *никеля* или *кобальта* жаропрочнее сталей. Сплавы на основе никеля применяют при температурах 700–1000°C, а кобальтовые сплавы не получили широкого применения из-за дефицитности.

Материалы высокой жаропрочности, применимые при температуре выше 1000°C, – это тугоплавкие металлы и их сплавы, керамика на основе SiC и Si₃N₄, графит.

В транспортном машиностроении применяют мартенситные и аустенитные стали, которые используют чаще всего в двигателях внутреннего сгорания.

Мартенситная сталь 40X10C2M – *сильхром* отличается повышенной стойкостью к окислению в атмосфере. Благодаря высокому содержанию легирующих элементов сталь глубоко прокаливается даже при нормализации (до 120–200 мм) и поэтому пригодна для деталей крупных сечений.

Термообработка – закалка или нормализация с температур 950–1100°C (для растворения карбидов) и отпуск при $T = 600\text{--}740^\circ\text{C}$. В машиностроении применяется для клапанов двигателей, а также крепёжных детали моторов. *Сильхромы* можно применять до рабочих температур 600–650°C. Однако есть недостаток – затруднена сварка, требуется подогрев перед сваркой и последующая термическая обработка.

Аустенитные стали типа **45X14H14B2M** отличаются большим содержанием легирующих элементов и углерода. Эти стали по жаропрочности превосходят перлитные и мартенситные и используются при температурах выше 600°C. Аустенитные стали отличаются большой пластичностью, хорошо свариваются, однако по сравнению с перлитными сталями труднее обрабатываются давлением и резанием.

Термообработка – закалка с температур 1100–1150°C и старение при температурах 700–750°C в течение 10–20 ч. *Аустенитные стали охрупчиваются при эксплуатации из-за выделения избыточных фаз по границам зёрен и особенно после образования хрупкой σ -фазы в интервале температур 600–750°C, особенно в сталях с повышенным содержанием хрома и молибдена. Для растворения образовавшейся σ -фазы проводят дополнительную термическую обработку после некоторого срока службы детали и тем самым устраняют охрупчивание и восстанавливают первоначальные свойства.*

Неметаллические жаропрочные материалы. *Графит и специальная керамика* – наиболее важные неметаллические материалы, используемые при температурах выше 1000°C.

Графит – один из перспективных материалов высокой жаропрочности. Уникальной особенностью графита является увеличение модуля упругости и прочности при нагреве. До 2200–2400°C прочность графита повышается максимально на 60%. При нагреве графит мало расширяется, хорошо проводит теплоту и поэтому устойчив против тепловых ударов. Ползучесть у графита проявляется при 1700°C и характеризуется небольшой скоростью. Материал легко прессуется в горячем состоянии и хорошо обрабатывается резанием. *Недостатки:* графит легко окисляется, уже при 520–560°C потеря массы составляет 1% за 24 ч, поэтому поверхность графитовых изделий защищают покрытиями.

Керамические материалы на основе SiC, Si₃N₄ и системы Si–Al–O–N являются лёгкими, прочными и износостойкими веществами. Они способны работать при $T = 1500\text{--}1800^\circ\text{C}$, стойки против коррозии

и эрозии, не боятся перегрева и не нуждаются в принудительном охлаждении. Керамика изготавливается из недефицитных материалов.

Применение: в двигателях внутреннего сгорания для изготовления поршней, головок блока цилиндров и других теплонапряжённых деталей.

Недостатки: хрупкость, сложность получения плотного беспористого материала и трудности изготовления деталей.

Контрольные вопросы и задания

1. Что такое хладостойкость?
2. Материалы с какими кристаллическими решетками подвержены хладноломкости?
3. Назовите основные группы хладостойких материалов.
4. Что является главным критерием хладостойкости?
5. Какие показатели являются определяющими при выборе хладостойких сталей и как определяется минимальная рабочая температура хладостойкой стали?
6. Объясните влияние углерода и легирующих элементов на свойства сталей климатического холода.
7. Как влияют на хладноломкость сера, фосфор, газы? В чём заключается десульфурация и дефосфорация хладостойкой стали?
8. Назовите особенности повышения хладостойкости литых сплавов. Какую роль играет алюминий на ударную вязкость в этих сталях?
9. Дайте характеристику цветным хладостойким сплавам.
10. Дайте описание неметаллическим хладостойким материалам.
11. Жаропрочные сплавы. Назовите критерии жаропрочности материалов.
12. Назовите основные группы жаропрочных материалов. Их применение.
13. Что относится к неметаллическим жаропрочным материалам?