

Лекция 03: Классификация сталей и сплавов (продолжение). Особенности применения

- сплавы:
 - чугуны
 - цветные сплавы: титановые
- Условия работы конструкционных материалов оборудования АЭС
- Требования к ТПА
- Материалы, применяемые в атомной энергетике
- Особенности применения импортных материалов
- Стали, применяемые ООО «РЭС Инжиниринг»
- Основные принципы подбора аналогов

Чугуны

Чугун – это сплав железа и углерода, содержание углерода в котором колеблется от 2,14% до 6,67%.

По структуре различают:

- серый чугун (СЧ)
- белый чугун (БЧ)
- половинчатый отбеленный чугун
- ковкий чугун (КЧ)
- высокопрочный чугун (ВЧ)

Белые чугуны (БЧ). Углерод в структуре связан практически полностью в виде различных карбидов. Его очень легко отличить, на изломе он белый и блестящий. Обладает **очень высокой твердостью, большой хрупкостью** и с трудом поддается обработке. Сварка белого чугуна затруднена, поскольку сопровождается образованием различных трещин во время нагрева и охлаждения.

Половинчатые отбеленные чугуны. отливки, поверхность которых состоит из белого чугуна, а внутри серый или высокопрочный чугун, структуре большое количество графита. В составе чугуна 2,8...3,6% углерода, и пониженное содержание кремния– 0,5...0,8 %. Имеют высокую поверхностную твердость (950...1000 НВ) и очень высокую износостойкость. В отливке в верхнем слое он белый, в тоже время в сердцевине он серый и Он прочен, но в тоже время легче поддается обработке, менее хрупок

Серый чугун (СЧ). Содержание углерода в составе обычно составляет 3,5%. В составе очень много графита. Прочный, достаточно износостойкий, хорошо поддается обработке. Из серого чугуна изготавливают детали, работающие при отсутствии ударной нагрузки.

Ковкий чугун (КЧ). Углерод в структуре хлопьевидной формы. В химический состав этого чугуна входит 14% кремния, 1% марганца. Ковкий чугун получают из белого чугуна. Для этого выполняют его термическую обработку, то есть нагревают и выдерживают в этом состоянии в течении заданного времени (томление).

Высокопрочный чугун (ВЧ). Углерод в структуре шаровидной формы. Их получают путем добавок в жидкий чугун магния, циркония в количестве (0,02 ÷ 0,08) %. Из высокопрочного чугуна изготавливают прокатные валики, кузнечнопрессовое оборудование, корпуса паровых турбин, коленчатые валы и другие ответственные детали, работающие при высоких циклических нагрузках и в условиях изнашивания

Коррозионная стойкость чугуна зависит от его химического состава, структуры и чистоты. Например, содержание кремния в чугуне до 7% отрицательно влияет на его химическую стойкость, а выше 11% положительно. Содержание марганца до 0,75% увеличивает химическую стойкость чугуна, а выше - уменьшает. Фосфор повышает стойкость чугуна против разрушения в щелочах и уменьшает в кислотах: Легирование, модифицирование, сфероидизация графитовых включения способствует повышению коррозионной стойкости чугуна.

Лекция 03: Классификация сталей и сплавов (продолжение). Особенности применения

Цветные металлы и сплавы

К цветным металлам и сплавам относятся практически все металлы и сплавы, за исключением железа и его сплавов.

Сплавы цветных металлов применяются для изготовления деталей, работающих в условиях агрессивной среды, подвергающиеся трению, требующих большой теплопроводности, электропроводности, при наличии ограничений по массе.

Для цветных сплавов характерны:

- определенная окраска;
- высокая пластичность;
- малая твердость;
- относительно низкая температура плавления;
- отсутствие полиморфизма.

Титан и его сплавы

Титан - металл серебристо-белого цвета, имеет плотность 4,5 г/см³, температуру плавления 1668 °С. Свойства титана сильно зависят от чистоты. Наличие азота и кислорода повышает прочность титана, но сильно снижает пластичность. Присутствие углерода снижает ковкость, ухудшает обрабатываемость резанием, свариваемость титана. Водород повышает чувствительность титана к хрупкому разрушению.

Титан обладает высокой коррозионной стойкостью в атмосфере, пресной и морской воде, в ряде кислот. Титан хорошо куется и сваривается. Упрочнение титана достигается наклепом, легированием, термической обработкой.

В титане удачно сочетаются **хорошая пластичность и механическая прочность** с высокой коррозионной стойкостью во многих агрессивных средах. Титан обладает меньшей плотностью по сравнению со сталью и, соответственно, намного легче. Многие благоприятные свойства титана (например, высокие прочностные характеристики и коррозионная стойкость, малая плотность, повышенная теплостойкость) делают его перспективным материалом для оборудования АЭС.

Титан хорошо куется и сваривается, хорошо обрабатывается давлением, легко прокатывается, штампуется, однако плохо обрабатывается резанием имеют низкую теплопроводность, а также обладает низкими, антифрикционными свойствами.

В атмосферных условиях на поверхности титана образуется плотная и прочная пленка TiO₂, которая обуславливает высокое сопротивление коррозии более чем в 130 агрессивных средах. По стойкости в воде высокой чистоты при высокой температуре сплавы титана превосходят аустенитные нержавеющие стали. **Вынос продуктов коррозии титана в теплоноситель пренебрежимо мал.** Сплавы титана не подвержены контактной, язвенной коррозии и, что особенно существенно, коррозии под напряжением

Титан легко насыщается газами и становится хрупким. Поэтому обработку и, в частности, его сварку следует производить в защитной среде. Исследования сплавов титана показывают, что длительная эксплуатация их в ядерных энергетических установках не вызывает насыщения их водородом и охрупчивания.

Технический титан (BT1-00 и BT1-0) используется для изготовления прессованных и катаных полуфабрикатов: листов, труб, проволоки и др. Он хорошо сваривается всеми видами сварки, но плохо обрабатывается резанием. В отличие от технического титана титановые сплавы обладают более высокими прочностью при комнатной температуре, жаропрочностью, жаростойкостью, коррозионной стойкостью, хладостойкостью.

Существенно повысить свойства технического титана позволяет легирование его различными металлами: алюминием, хромом, марганцем, железом, оловом, молибденом, ванадием.

Лекция 03: Классификация сталей и сплавов (продолжение). Особенности применения

Обозначаются титановые сплавы буквами ВТ, за которыми следует номер сплава (ВТ 5, ВТ 6, ВТ 14, ВТ 3-1 и др.).

Сплавы титана технологичнее. В качестве конструкционного материала чаще используют титан не в чистом, а сплавы. Сплавы превосходят чистый титан по прочности, естественно уступая ему по пластичности и вязкости. Сплавы титана обладают высокой прочностью, коррозионной стойкостью во многих агрессивных средах. Также сплавы немагнитны и обладают хорошей жаропрочностью. Сплавы хорошо куется, штампуются, прокатываются (только в горячем состоянии).

Большинство сплавов титана хорошо свариваются аргонно-дуговой сваркой. Сварные швы пластичны. При толщине металла более 3 мм сварные швы для снятия внутренних напряжений отжигают. При проведении сварки титановых сплавов во избежание появления дефектов в швах, основными из которых являются поры и холодные трещины, необходимо тщательное удаление поверхностной оксидной пленки основного и присадочного материала. Из-за химической активности титана обязательна защита инертными газами сварочной ванны и остывающих участков от соприкосновения с воздушной атмосферой.

По структуре различают:

- α -сплавы;
- β -сплавы (упрочняемые термообработкой);
- ($\alpha + \beta$)-сплавы (наиболее распространены).

В промышленности применяются титановые сплавы либо со структурой α -твердого раствора, либо со смешанной структурой ($\alpha+\beta$)-твердые растворы.



Легирующие элементы образуют с титаном твердые растворы замещения и вместе с примесями изменяют температуру полиморфного превращения $\alpha \leftrightarrow \beta$. Те из элементов, которые повышают температуру $\alpha \leftrightarrow \beta$ -превращения, называются α -стабилизаторами (алюминий, кислород, азот), те, которые понижают (молибден, ванадий, ниобий, хром, марганец, железо) – β -стабилизаторами, так как способствуют стабилизации β -твердого раствора.

Кроме α - и β -стабилизаторов имеются нейтральные упрочнители (олово, цирконий, гафний), которые не оказывают существенного влияния на аллотропические превращения.

Титановые сплавы с α -структурой до температуры 650 °С сохраняют достаточно высокую прочность и до 1090 °С – коррозионную стойкость в атмосфере, загрязненной газами. Хорошо свариваются, не охрупчиваются после термической обработки. Однако пластичность при изгибе хуже, чем у β -сплавов. Недостатками также являются невозможность получения высокопрочных сплавов и невосприимчивость к закалке и старению.

Сплавы с β -структурой имеют очень хорошую пластичность, сохраняют достаточно высокую прочность до 540 °С, упрочняются термической обработкой. Но, с другой стороны, очень чувствительны к загрязнению атмосферными газами при температурах выше 700 °С, часто охрупчиваются при старении.

Титановые $\alpha + \beta$ -сплавы пластичны, легко куется, штампуются и прокатываются; упрочняются термической обработкой. Существенным недостатком является высокая чувствительность к термической обработке, что при недостаточном контроле ведет к охрупчиванию.

Классификация по технологическим признакам представлена на Схема 1.



Схема 1. Классификация титановых сплавов по технологическим признакам



Схема 2. Классификация деформируемых сплавов неупрочняемых термической обработкой

Литейные титановые сплавы обладают хорошими литейными свойствами: высокие жидкотекучесть и плотность отливок, малая усадка. Однако из-за активного взаимодействия титана с газами и формовочными материалами необходимо производить их плавку и разливку в вакууме или в среде нейтральных газов. По сравнению с деформируемыми сплавами литейные сплавы имеют низкую стоимость, меньшую прочность, пластичность и выносливость.

Арматура из титановых сплавов пригодна для работы в коррозионных средах при низких и повышенных температурах, часто выполняется сварной. Из титановых сплавов могут изготавливаться также сильфоны. Титан стоек в атмосферных условиях, в пресной и морской воде, горячих минеральных маслах, щелочах калия и натрия, пищевых продуктах, в ряде кислот, а также хорошо сопротивляется гидравлической кавитации и действию HNO_3 любой концентрации, но в дымящей кислоте он подвержен коррозионному растрескиванию. Титан не устойчив в соляной и плавиковой кислотах при повышенных температурах и сильно корродирует в горячих органических кислотах (щавельной, муравьиной и др.). Титан имеет низкие антифрикционные свойства и склонен к задиранию при трении скольжения, поэтому рабочие поверхности деталей арматуры из титана должны подвергаться соответствующей обработке или наплавке.

Титан и сплавы на его основе, имея малый удельный вес, высокие механические свойства и удельную прочность, очень высокую коррозионную стойкость, **обладают низкой износоустойчивостью и склонностью к налипанию и образованию задигов** при работе в узлах трения. Это ограничивает применение титановых сплавов для изготовления деталей, работающих на трение. Износостойкость титана и его сплавов может быть повышена химико-термической обработкой.

Термическое оксидирование титановых сплавов является наиболее простой из применяемых в промышленности химико-термической обработкой, так как не требует специализированного оборудования и проводится в открытых электропечах в интервале температур (700 ÷ 800) °С. При температурах ниже 700 °С процессы окисления и диффузии кислорода в титан заторможены, а при

Лекция 03: Классификация сталей и сплавов (продолжение). Особенности применения

температурах выше 800 °С наблюдается большой рост зерна, ухудшается структура, приводящая к понижению механических свойств основного металла.

Марки и свойства титановых сплавов, используемых в арматуростроении для изготовления деталей и наплавки представлены в Таблица 1.

Таблица 1 – Титановые сплавы, применяемые в арматуростроении

Марка сплава	Состояние материала	σ _T , МПа	σ _B , МПа	δ, %	Ψ, %
		не менее			
BT 1-0	Поковки, прутки, листы	-	500	25	50
OT4	Поковки, прутки, листы	-	800	11	30
OT4-0	Поковки, прутки, листы	-	500	20	40
OT4-1	Поковки, прутки, листы	-	600	15	34
PT-3B	Поковки, прутки, листы Сортовой прокат	590	635	11	26
BT 5-1	Поковки, прутки, листы	-	735	6	12

В результате термического оксидирования титановых сплавов происходит насыщение поверхности деталей кислородом и образование твердого износостойкого диффузионного слоя, состоящего из двух зон: слоя окислов титана типа TiO₂ с толщиной 3-7 мкм и газонасыщенного слоя, представляющего собой твердый раствор внедрения кислорода в титане глубиной 15 ÷ 80 мкм. При температуре оксидирования 700 °С, образующийся слой окислов на поверхности имеет плотное строение и прочно связан с газонасыщенным слоем и с сердцевиной металла.

Условия работы конструкционных материалов оборудования атомных электрических станций

Атомная энергетика имеет свои особенности в области материаловедения и используемых конструкционных материалов. И это, прежде всего **длительная эксплуатация конструкционных материалов оборудования и трубопроводов** в т.ч. в условиях радиационного воздействия, повышенных температур, рабочих нагрузок, коррозионно-эрозионных воздействий.

Вспомним: правильный выбор конструкционных материалов и сохранение их свойств в процессе эксплуатации является одним из основных критериев, определяющих надежную и долговечную работу оборудования и трубопроводов АЭС. Поэтому необходимо иметь представление о требованиях, предъявляемых к конструкционным материалам в области АЭ, условиях работы и требованиях, влиянии эксплуатационных факторов на их свойства и структуру, а также мероприятиях по продлению ресурса металла оборудования.

По сравнению с энергетическими установками, работающими на органическом топливе, условия работы конструкционных материалов в атомных энергетических установках обычно являются более сложными и многофакторными. При выборе конструкционных материалов для ядерных энергетических установок (ЯЭУ) различных типов и ответственного оборудования необходимо принимать во внимание следующие основные условия:

- напряжения от механической нагрузки, которые в первую очередь определяются давлением теплоносителя при заданных геометрических формах и размерах элементов оборудования;
- рабочую температуру, состав рабочей среды;

Лекция 03: Классификация сталей и сплавов (продолжение). Особенности применения

- число и величину циклических изменений механических нагрузок и теплосмен;
- нейтронное облучение;
- влияние рабочей среды на коррозию и коррозионно-механическую прочность материалов.

Применяемые материалы должны:

- обеспечить конструкционную прочность /деталей оборудования АЭС, т. е. быть прочными, пластичными, в ряде случаев способными работать в условиях высоких динамических нагрузок;
- быть технологичными, легко подвергаться обработке давлением, резанием, прокатке, хорошо свариваться;
- механические характеристики материалов не должны изменяться в процессе длительной эксплуатации при высокой температуре и в условиях изменения механических напряжений, действующих на материал, по значению и знаку;
- материалы, эксплуатирующиеся в условиях вибрации не должны разрушаться вследствие усталости, в том числе и малоциклового, и должны обладать высокой циклической прочностью.

При умеренных температурах в условиях коррозионно-активной среды (например, в среде влажного пара, содержащего примеси) в ряде конструктивных элементов наблюдается трещинообразование. Зарождение и развитие трещин может происходить в этих условиях и при постоянных нагрузках. Время эксплуатации детали должно оцениваться с учетом трещиностойкости.

Медленно меняющиеся воздействия характерны для переходных режимов – пуска, нагружения, разгрузки и остановки оборудования (например, турбин). Чередование стационарных и переходных режимов вызывает накопление повреждений от ползучести и малоциклового усталости. Взаимодействие повреждений таково, что чем больше число часов работы на стационарном режиме, тем меньше возможное число пусков и наоборот.

Если в потоке рабочей среды присутствуют жидкие или твердые частицы, при столкновении с деталью вызывающие поверхностное ее повреждение, то наблюдается эрозия металла. Также они могут вызывать коррозию различного вида: общую, язвенную, коррозионно-эрозионный износ и др., а также служат причиной коррозионного растрескивания под напряжением и коррозионной усталости.

Общие требования к конструкционным материалам оборудования и трубопроводов АЭС

Трубопроводная арматура на АЭС обслуживает все контуры, трубопроводы, силовые агрегаты, цистерны, баки, резервуары, бассейны, связанные с использованием или транспортировкой жидких и газообразных сред. Условия работы арматуры различны для разных участков и зависят от места ее расположения и энергетических параметров АЭС.

Все энергетическое оборудование по отдельным стадиям технологического процесса АЭС можно разделить на следующие установки: реакторную, парогенерирующую, паротурбинную, конденсационную и конденсатно-питательный тракт. Наибольшие диаметры прохода имеет арматура **первого контура**. Она работает в наиболее сложных условиях и к ней предъявляется целый ряд специфических требований как по химическому составу и механическим характеристикам металла, так и по герметичности и надежности конструкции. Вода или пар первого контура содержит твердые радиоактивные окислы, которые могут оседать на стенках трубопровода и арматуры. Степень радиоактивности среды зависит от количества окислов, образующихся в связи с коррозией металла, поэтому главные трубопроводы и арматура изготавливаются из коррозионностойкой стали 08X18N10T или из углеродистой стали, плакированной коррозионностойкой, а все соединения выполняются сваркой. Все элементы главного Контура, в том числе и арматура, должны иметь полости возможно простой формы, доступные для тщательной обработки главных трубопроводов для надежного отключения системы паропроводов одной турбины снабжены двойными запорными задвижками с электроприводом.

Лекция 03: Классификация сталей и сплавов (продолжение). Особенности применения

Трубопроводы **второго контура** работают на нерадиоактивной среде, но и они требуют тщательного выполнения, и арматура на них также присоединяется сваркой.

Материалы для изготовления оборудования и трубопроводов АЭС должны выбираться с учетом требуемых физико-механических характеристик, технологичности, свариваемости и работоспособности в условиях эксплуатации в течение срока службы.

Качество и свойства основных материалов (полуфабрикатов и заготовок) должны удовлетворять требованиям соответствующих стандартов и технических условий и должны быть подтверждены сертификатами заводов-поставщиков. Данные сертификатов должны подтверждать соответствие поставляемых основных материалов требованиям стандартов или технических условий на конкретные полуфабрикаты и заготовки. При неполноте сертификатных данных применение материалов допускается только после проведения предприятием-изготовителем оборудования и трубопроводов необходимых испытаний и исследований, подтверждающих полное соответствие материалов требованиям стандартов или технических условий.

Предприятие-изготовитель оборудования и трубопроводов должно осуществлять входной контроль качества поступающих основных материалов по номенклатуре и в объеме, устанавливаемыми техническими условиями на изделие. Оценка качества материалов проводится в соответствии с требованиями стандартов и технических условий на конкретные полуфабрикаты и заготовки. Методы и объем контроля основных материалов должны определяться на основании стандартов и технических условий конструкторской (проектной) организацией, указываться в конструкторской документации и согласовываться с предприятием-изготовителем (монтажной организацией), с учетом требований НП-068, НП-089.



Требования, предъявляемые к материалам активной зоны

Материалы, применяемые для оборудования первого контура, должны обладать высокой общей коррозионной стойкостью в воде прежде всего потому, что продукты коррозии при переносе потоком теплоносителя могут вызвать ряд осложнений:

- *ухудшение теплоотдачи тепловыделяющих элементов при отложении продуктов коррозии на теплопередающих поверхностях;*
- *ухудшение радиационной обстановки всего контура; засорение каналов, уменьшающее расход теплоносителя;*
- *ухудшение условий работы пар трения вплоть до заклинивания движущихся частей.*

Стали и сплавы оборудования первого контура по стойкости к равномерной поверхностной коррозии должны относиться к материалам 1-3 групп стойкости по ГОСТ 9.908-85, т. е. иметь скорость коррозии не более 0,01 мм/год.

Пониженная общая коррозионная стойкость, а также ряд других обстоятельств обуславливают применение коррозионностойких сталей и сплавов для деталей и узлов, работающих в контакте с водой первого контура, и аустенитных наплавки для защиты корпусных конструкций из перлитных сталей.

Корпус реактора и крышка в рабочих условиях подвергаются воздействию механических напряжений вследствие избыточного давления в реакторе, термических нагрузок в стационарных и особенно в нестационарных температурных режимах, вибрационных нагрузок, а на транспортных установках, кроме того, действию ударных нагрузок. Материал корпуса, находясь в условиях всех видов облучения, должен иметь высокую прочность при достаточном уровне пластичности. Облучение корпуса реактора в течение всего периода работы не должно вызывать охрупчивания материала. В связи с этим выдвигается требование высокой радиационной стойкости. Материал корпуса должен иметь хорошую теплопроводность и низкий коэффициент теплового расширения, чтобы не возникали высокие температурные напряжения, а также должен быть стоек к малоцикловой усталости.

Материал корпуса должен быть стойким к коррозии. Загрязнение теплоносителя радиоактивными продуктами коррозии ухудшает радиационную обстановку и усложняет обслуживание и ремонт оборудования. Местная коррозия может привести к возникновению концентраторов напряжений в металле и увеличению вероятности его разрушения. Наводороживание, особенно в сочетании с облучением, может вызвать охрупчивание материала корпуса. Для уменьшения коррозионных процессов материала корпуса на его внутренней поверхности, соприкасающейся с теплоносителем, делается наплавка толщиной 8-12 мм из коррозионностойкого материала. Эта наплавка также уменьшает возможность наводороживания корпуса реактора.

Материал корпуса должен быть технологичным и хорошо свариваться в больших толщинах. Высокий уровень местных напряжений в сварных соединениях требует последующей термической обработки. Термическая обработка корпуса, имеющего значительные габариты, вызывает серьезные трудности.

Следует отметить также, что высокая прочность материала корпуса реактора позволяет снизить его массу и габариты, что в ряде случаев крайне важно.

Требования, предъявляемые к материалам оборудования, находящегося вне активной зоны

К оборудованию, работающему вне активной зоны реактора ВВЭР, относятся главные циркуляционные трубопроводы, поверхности нагрева парогенератора, трубопроводная арматура, главные циркуляционные насосы и вспомогательные реакторные системы, оборудование турбоустановки и конденсатно-питательного тракта.

Лекция 03: Классификация сталей и сплавов (продолжение). Особенности применения

К материалам трубопроводов и паропроводов предъявляют требование высокой прочности и способности противостоять хрупкому разрушению. Материал трубопроводов должен быть коррозионностойким (поверхность их обычно значительна). Продукты коррозии, переходящие в теплоноситель, ухудшают радиационную обстановку и создают опасность образования отложений на поверхности ТВЭЛов. Скорость потока теплоносителя в трубопроводах велика – до 10 м/с, но в циркуляционных насосах она еще выше. Материалы, из которых изготовлены узлы насоса, должны быть стойки не только к коррозии, но и к кавитационной эрозии.

Особенности применения материалов для оборудования АЭС

Помимо материалов, применяемых ООО «РЭС Инжиниринг» с перечнем рекомендуемых конструкционных материалов, применяемых в арматуростроении (а таких примерно ~ 200 наименований), можно ознакомиться в стандарте АО «НПФ «ЦКБА» - СТ ЦКБА 005.1-2003 «Металлы, применяемые в арматуростроении».

Однако, не все конструкционные материалы, перечисленные в этом документе, допустимы для использования при изготовлении основных деталей арматуры для АЭС.

Перечень допустимых для применения материалов для изготовления деталей оборудования АЭС определен НП 089-2015 (Приложение 1 к Сводному перечню документов по стандартизации). В Приложении перечислены марки применяемых основных материалов, нормативные документы на основные материалы и крепёжные изделия, а также предельные температуры применения материалов при нормальной эксплуатации АЭУ. Химический состав, механические характеристики, технологии изготовления, включая термическую обработку, методы контроля и нормы оценки качества, должны удовлетворять требованиям нормативных документов, указанных в Перечне.



Под основными понимаются детали, влияющие на герметичность арматуры по отношению к внешней среде. К ним относятся корпусные детали (корпус, крышка, а также шток, шпindelь, основной силовой крепеж), т.е. детали, находящиеся под давлением рабочей среды.

Резюмируя сказанное выше, сформулируем общие правила применения материалов в атомной энергетике.

Материалы применяются в термообработанном состоянии в соответствии с указаниями нормативных документов на поставляемые основные материалы или с требованиями конструкторской документации. Качество и свойства основных материалов должны удовлетворять требованиям этих документов и должны быть подтверждены сертификатами заводов-изготовителей.

При неполноте сертификационных данных применение материалов допускается только после проведения предприятием-изготовителем оборудования необходимых испытаний и исследований, подтверждающих полное соответствие материалов требованиям стандартов или ТУ.

Предприятие-изготовитель оборудования должно осуществлять входной контроль поступающих основных материалов по номенклатуре и в объеме, устанавливаемыми ТУ на изделие. Методы и объемы контроля определяются проектной организацией и указываются в КД.

Для головного объекта методы и объемы контроля основных материалов согласовываются с головной металлургической организацией.

В отдельных случаях допускается применение материалов для работы при повышенных параметрах (например, при температуре выше, обозначенной в Перечне НП-089), а также новых материалов (материалов неуказанных в Перечне НП-089). Это возможно по совместному техническому решению конструкторской организации, головной металлургической организации и предприятия-изготовителя оборудования. К указанному техническому решению должны быть приложены документы, подтверждающие необходимые физико-механические, технологические, коррозионные свойства материалов, определяющих возможность изготовления оборудования требуемого качества и надежности (включая свариваемость и режимы термообработки), а также необходимые данные о механических свойствах при температуре 20° С и рабочих температурах (временное сопротивление разрыву - предел прочности при разрыве, предел текучести, относительное удлинение, относительное сужение, характеристики ползучести, длительной

Лекция 03: Классификация сталей и сплавов (продолжение). Особенности применения

прочности, длительной пластичности, сопротивления циклическому и хрупкому разрушению). Порядок применения новых материалов также изложен в НП-089.

Если в качестве заготовок корпусных деталей используются литые полуфабрикаты, то их качество должно удовлетворять требованиям ПНАЭ Г-7-025-90 «Правила контроля стальных отливок для атомных энергетических установок».

Отдельно следует выделить требования к крепежным деталям.

Крепежные детали (болты, шпильки, гайки) для соединения фланцев, узлов, узлов уплотнения разъемов и присоединения крышек, как правило должны изготавливаться из сталей того структурного класса, что и соединяемые элементы. Различные структурные классы сталей допустимы в следующих случаях:

- если расчетная температура эксплуатации не превышает 50 °С;
- в отношении подбора пар крепежных деталей «болт-гайка», «шпилька-гайка» следует сказать дополнительно, что эта пара требует для обеспечения нормального свинчивания разницу в твердости хотя бы 12 единиц НВ. При этом шпилька должна быть тверже.

Основные служебные свойства конструкционных материалов оборудования АЭС

Надежная работа оборудования ядерных энергетических установок может быть обеспечена лишь в том случае, когда конструкционные материалы обладают высокой прочностью, жаропрочностью, достаточной радиационной стойкостью.

Для правильного выбора материалов необходимо знать, как изменяются их свойства в процессе эксплуатации. Рассмотрим основные характеристик материала, обеспечивающих возможность применения в энергетическом оборудовании.

Основные характеристики материала, обеспечивающие возможность применения в энергетическом оборудовании:

- механическая прочность
- пластичность
- вязкость
- жаростойкость
- жаропрочность
- ползучесть
- усталость

Про механическую прочность, пластичность, вязкость подробно разобрали в лекции 01, остановимся в этой лекции подробнее на более специфичных свойствах.

Механическая прочность представляет собой способность элементов конструкции выдерживать напряжения, обусловленные действием внешних или эксплуатационных нагрузок. В общем случае механическая прочность элементов конструкции должна обеспечиваться при любых условиях эксплуатации. Мерой механической прочности конструкции являются напряжения, возникающие в ней под действием эксплуатационных нагрузок.

Пластичность характеризует способность материала течь или испытывать постоянную деформацию перед окончательным разрушением при растяжении. Абсолютной меры пластичности нет, однако в качестве показателей пластичности обычно используются относительное удлинение и относительное сужение. Чем больше эти показатели, тем пластичнее материал.

Вязкость характеризует способность материала выдерживать без разрушения ударные нагрузки (механические или термические). Хотя ударная вязкость и не является абсолютной мерой, её используют для оценки вязкости. Иногда под вязкостью понимают сочетание высокой механической прочности и большой пластичности материала.

Жаропрочность

Лекция 03: Классификация сталей и сплавов (продолжение). Особенности применения

Вспомним: жаропрочность – способность металлов и сплавов длительно работать без разрушения под воздействием внешних нагрузок и повышенных температур.

В процессе эксплуатации металла при высоких температурах ускоряются диффузионные процессы, изменяются исходные микроструктура и механические свойства материалов. Увеличение жаропрочности конструкционных материалов возможно за счет легирования тугоплавкими элементами.

Основными показателями, характеризующими жаропрочность материала, являются предел длительной прочности и сопротивление ползучести при высоких температурах.

В общем случае, ползучестью принято называть необратимое деформирование материала при постоянной нагрузке (напряжении) и температуре.

Особенно эффективно явление ползучести в металлах проявляется при высоких температурах, в связи с чем, определяющей характеристикой жаропрочных сталей для тепловой энергетики является их сопротивление ползучести, которая характеризуется двумя величинами:

- пределом ползучести, за которое принимается постоянное напряжение, вызывающее за определенное время при заданной температуре деформацию, не превышающую заданной величины;
- временем до разрушения

На скорость ползучести может сильно влиять термическая обработка, в результате которой происходит упрочнение металла вследствие выделения из пересыщенных твердых растворов упрочняющих фаз. Такие фазы в виде карбидов, нитридов, интерметаллидов создают препятствия и затрудняют пластическую деформацию, что приводит к снижению скорости ползучести.

Жаростойкость

Вспомним: жаростойкость (окалиностойкость) – способность металлов и сплавов сопротивляться окислению и газовой коррозии при высоких температурах. При низкой жаростойкости происходит преждевременное разрушение поверхностных слоев металлов и сплавов, что вызывает большие проблемы при эксплуатации деталей и конструкций в коррозионных газовых средах.



Железо с кислородом может образовывать оксиды (трех видов FeO , Fe_3O_4 , Fe_2O_3). До (560 – 600) °C окалина состоит преимущественно из плотного слоя оксидов Fe_3O_4 , Fe_2O_3 , что затрудняет диффузию атомов кислорода и металла. Выше 600 °C происходит растрескивание этих оксидов и вместо их защита металла осуществляется лишь рыхлым слоем оксида FeO , что облегчает доступ кислорода к поверхности металла. Нагрев при температурах выше 600 °C приводит к интенсивному окислению сплавов на основе железа.

Жаростойкость зависит от многих внешних и внутренних факторов. На жаростойкость материалов существенное влияние оказывает состояние поверхности металла. Чем более тщательно обработана поверхность (например, шлифовкой и полировкой), тем медленнее идет процесс окисления, так как оксиды распределены равномерно и более прочно сцеплены с поверхностью металла. Образующаяся на поверхности оксидная пленка защищает металл от дальнейшего окисления. Защитные свойства оксидной пленки повышаются, если она плотная, не пропускает ионы кислорода и не отслаивается при механическом воздействии.

Основным фактором, влияющим на жаростойкость, является химический состав металла, определяющий защитные свойства оксидной пленки. Хром, алюминий наряду с кремнием используют для повышения жаростойкости легированных сталей. Они обладают большим сродством с кислородом чем железо и благоприятным образом изменяют состав и строение окалины. Чем выше содержание хрома, алюминия или кремния, тем выше окалиностойкость сталей и тем выше рабочая температура.

Структура жаростойкого материала должна быть однородной и однофазной. Термическая обработка изменяет строение сплавов и, следовательно, их жаростойкость. Отжиг и нормализация приводят к формированию однофазной структуры и способствуют увеличению жаростойкости металла.

Лекция 03: Классификация сталей и сплавов (продолжение). Особенности применения

Величина зерна практически не влияет на жаростойкость металла. Пластическая деформация снижает жаростойкость, приводит к образованию остаточных напряжений и увеличению их градиента в структуре металла.

Усталость материалов

Усталостные поломки составляют основной вид разрушения деталей оборудования и нередко приводят к тяжелым последствиям, так как возникают внезапно. Разрушение происходит без заметной пластической деформации, как правило в зоне концентрации напряжений. Источником усталостного разрушения является действие переменных (во времени) напряжений, приводящие к накоплению микропластических деформаций зерен материала при повторном циклическом деформировании.

Процесс постепенного накопления микропластических деформаций приводит к образованию микротрещины, которая начинает расти при повторных приложениях нагрузки в результате концентрации напряжений у ее краев. Усталостное разрушение — разрушение в результате постепенного развития трещины при повторных нагружениях.

При усталостном разрушении на поверхности излома всегда обнаруживаются две зоны: зона зарождения и развития трещины и зона окончательного излома. Зона развития трещины обычно имеет гладкую поверхность, так как микронеровности «стираются» при повторном сближении краев трещины. Излом происходит в результате ослабления сечения, когда статическая прочность оказывается недостаточной. Если статическая нагрузка невелика усталостная зона излома может составлять от 50% до 70% общей поверхности излома.

Начало усталостного излома возникает в местах действия наибольших переменных напряжений, обычно на поверхности детали.

При высоком уровне переменных напряжений может возникнуть несколько очагов развития усталостной трещины.

Усталостное разрушение часто начинается в местах концентрации напряжений. Особое значение для усталостной прочности имеют поверхностные слои элемента конструкции. Усталостное разрушение в отличие от статического имеет резко выраженный локальный характер.

Коррозионная стойкость

В зависимости от химического состава стали, рабочей среды и условий работы материалы энергетического оборудования могут подвергаться коррозионному повреждению, протекающему по различным механизмам, в т.ч. общая коррозия, питтинговая коррозия, гальваническая коррозия, щелевая коррозия, коррозионное растрескивание под напряжением и др.

Наряду с традиционными способами повышения коррозионной стойкости материалов (таких как сохранение чистоты твердых поверхностей и рабочей среды, предотвращение отложений химических соединений на твердых поверхностях, защита сварных соединений и механически обработанных участков от коррозионного воздействия как в статических, так и в динамических условиях), значительную роль играет обеспечение необходимых механических, термических и других характеристик материала в течение всего срока службы, в т.ч. за счет термической обработки.

Ниже рассмотрим описание свойств групп сталей, применяемых в АЭ и их особенности

Перлитные стали

В последнее время для изготовления оборудования АЭС находят широкое применение стали перлитного класса, содержащие (0,08 ÷ 0,4) %С. Суммарное содержание легирующих элементов в них не превосходит (5 ÷ 6) %.



При проектировании и строительстве первых энергетических реакторов в качестве основного конструкционного материала использовали аустенитную хромоникелевую нержавеющую сталь. Объяснялось это ее высокой коррозионной стойкостью, сводящей к минимуму загрязнение продуктами коррозии воды I контура. По мере накопления опыта реакторостроения выяснилось, что в ряде случаев аустенитная хромоникелевая нержавеющая сталь не является оптимальным материалом для изготовления некоторых узлов I контура. В

Лекция 03: Классификация сталей и сплавов (продолжение). Особенности применения

частности, прочность аустенитной хромоникелевой нержавеющей стали недостаточна для изготовления из нее корпуса реактора.

Замена нержавеющей сталей на стали перлитного класса существенно снижает стоимость атомных электростанций. Продукты коррозии перлитных сталей не содержат кобальта. Большинство перлитных сталей технологичны, освоены промышленностью. Коррозионная стойкость перлитных сталей ниже, чем стойкость нержавеющей сталей. В случае применения перлитных сталей в I контуре атомных энергетических установок необходимо принимать меры к увеличению их стойкости, в частности с помощью поддержания соответствующего водного режима, использования защитных покрытий, наплавки и т. д.

Для изготовления корпусов реакторов с водным теплоносителем используют стали, перлитного класса легированные для повышения механических характеристик Cr, Mo, V, Mn.

В реакторе с водным теплоносителем корпус и крышку, изготовленные из перлитной стали, для уменьшения загрязнения воды I контура продуктами коррозии и предотвращения наводороживания корпуса покрывают нержавеющей сталью методом наплавки. В последнее время при соблюдении соответствующего водного режима применяют корпуса из перлитной стали без плакировки нержавеющей сталью.

Выполненные исследования и накопленный опыт применения низколегированных Cr-Mo и Cr-Mo-V сталей в энергомашиностроении и химическом машиностроении послужили основанием создания и широкого внедрения в реакторостроении теплоустойчивых сталей с содержанием углерода (0,13 ÷ 0,18) %, хрома (2,5 ÷ 3,0) %, молибдена (0,6 ÷ 0,8) % и ванадия (0,25 ÷ 0,35) % для сварных конструкций до 400 мм, это сталь 15X2МФА. Для несвариваемых элементов толщиной до 600 мм содержание углерода было повышено до (0,22 ÷ 0,27) %, а содержание хрома до (2,8 ÷ 3,3) % - сталь 25X3МФА. Стали Cr-Mo-V применены для корпусных конструкций водоохлаждаемых реакторов мощностью до 440 МВт. Другие сосуды давления для АЭС изготавливаются из котельной углеродистой стали 22К.

Коррозионностойкие стали для элементов оборудования водо-водяных энергетических установок

В атомных энергетических установках с водой в качестве теплоносителя наибольшее применение получили коррозионностойкие стали двух типов:

а) хромоникелевые стали на базе классической композиции 18-8, имеющие в основном аустенитную структуру;

б) хромистые стали без никеля или с небольшими присадками этого элемента, имеющие мартенситную или мартенситно-ферритную структуру.

Хромоникелевые стали в воде первого контура имеют скорость общей коррозии не более 0,001-0,002 мм/год. Высокая технологичность при металлургических переделах, а также хорошая свариваемость являются практически важными особенностями хромоникелевых сталей. Сварка различными способами может производиться для любых практически применяемых толщин без предварительного подогрева и последующей термической обработки.

Хорошая свариваемость и высокая металлургическая технологичность обеспечиваются ограничением минимального и максимального содержания ферритной фазы в основной аустенитной структуре. Необходимо иметь не более 15% ферритной фазы. Оптимальным с точки зрения обеспечения свариваемости является наличие в литом металле (например, в наплавке) около 5% ферритной фазы. Регламентация количества ферритной составляющей обеспечивает хромоникелевым сталям, их сварным соединениям и наплавкам также высокую стабильность свойств при длительных выдержках в области рабочей температуры.

Для наиболее применяемых хромоникелевых аустенитных сталей характерны невысокая прочность при хорошей пластичности и высокой вязкости. Опасность хрупких разрушений конструкций из этих материалов практически отсутствует.

Лекция 03: Классификация сталей и сплавов (продолжение). Особенности применения

Для АЭС с водоохлаждаемыми реакторами получили применение хромоникелевые стали типа 18-8, стабилизированные титаном. Легирование титаном обеспечивает стойкость к межкристаллитной коррозии и некоторое дополнительное упрочнение стали. В зарубежном реакторостроении среди хромоникелевых аустенитных сталей простых составов наибольшее применение получили низкоуглеродистые составы без добавок карбидообразующих элементов, стабилизирующих углерод, но с пониженным содержанием углерода. Эти стали имеют более низкие характеристики прочности при рабочей температуре.

Высокая вязкость аустенитных хромоникелевых сталей в исходном состоянии и достаточная стабильность механических свойств при длительных выдержках в области рабочей температуры и при нейтронном облучении делают излишней оценку опасности хрупких разрушений практически для любой толщины. Однако чрезмерное упрочнение хромоникелевых сталей под влиянием облучения может повысить их чувствительность к коррозионному растрескиванию в воде реакторных параметров.

Циклическая прочность, определенная для исходного состояния, также может рассматриваться как стабильная характеристика вплоть до облучения потоками быстрых нейтронов, максимально возможными для корпусных конструкций водоохлаждаемых реакторов.

Однако, аустенитная хромоникелевая нержавеющая сталь, подвержена таким видам разрушения, как коррозионное растрескивание и межкристаллитная коррозия. Никель, которым легируют нержавеющую сталь, всегда содержит примеси кобальта. В связи с этим кобальт можно обнаружить, хотя и в незначительных количествах, в продуктах коррозии нержавеющей аустенитных хромоникелевых сталей, переходящих в воду I контура. Этим незначительным количеством кобальта оказывается достаточно для серьезного ухудшения радиационной обстановки. Через месяц после останова основной вклад в активность оборудования I контура вносят радиоизотопы кобальта.

Хромистые стали мартенситного, мартенситно-ферритного и ферритного классов при рабочих параметрах теплоносителя первого контура водо-охлаждаемых атомных реакторов имеют скорость общей коррозии не более 0,002-0,008 мм/год. Хромистые коррозионностойкие стали отличаются от хромоникелевых аустенитных сталей существенно более высокими характеристиками прочности. В то же время эти материалы склонны к хрупким разрушениям, а технологичность при металлургических пределах, а также при выполнении сварки обычно невелика. В связи с этим типичным является применение хромистых сталей только для изделий относительно небольших размеров, например, для деталей внутриреакторных механизмов.

Хромистые коррозионностойкие стали мартенситного класса имеют относительно низкую ударную вязкость. Характерно, что ударная вязкость для сталей в низко- и высоко-отпущенном состоянии различается незначительно, однако отпуск при промежуточных значениях температуры может приводить к двукратному падению ударной вязкости стали. Установлено, что длительные нагревы при 340° С хромистых сталей 20X13 и 14X17B2, прошедших закалку с 1050° С и высокий отпуск при 650°С, не снижают заметно их ударной вязкости. Сталь 14X17H2 характеризуется более высоким уровнем ударной вязкости при длительных нагревах.

Сталь 14X17H2 характеризуется также сильной анизотропией свойств. Это ограничивает рациональную область применения стали 14X17H2 деталями типа валов и штоков.

Хромистые стали являются хладноломкими. Нейтронное облучение сдвигает температурный порог хрупкости хромистых сталей в сторону большей температуры и снижает уровень ударной вязкости при рабочей температуре. Сопротивление усталости при малоцикловом нагружении высоко отпущенных хромистых нержавеющей сталей и хромоникелевых аустенитных сталей типа 18-8 является сходным. В низко отпущенном состоянии при долговечности не более 10³ циклов наблюдается тенденция к снижению сопротивления малоциклового усталости.

Высокое сопротивление общей коррозии хромоникелевых и хромистых сталей, может сочетаться с низким сопротивлением локальной, особенно межкристаллитной коррозии, а также с низкой коррозионно-механической прочностью. Эти процессы, являющиеся во многих случаях причиной повреждения деталей атомных энергетических установок.

Лекция 03: Классификация сталей и сплавов (продолжение). Особенности применения Требования, предъявляемые к арматуре АЭС

Общие требований, предъявляемые к арматуре АЭС представлены в Приложении 2.

При проектировании арматуры для радиоактивных теплоносителей должны учитываться возможные изменения физико-механических свойств материалов под действием радиоактивного облучения. Конструкции и материалы арматуры, в которой находится радиоактивный теплоноситель, должны обеспечивать возможность промывки дезактивирующими растворами, а материалы обладать необходимой стойкостью.

Конструкционные материалы трубопроводной арматуры АЭС и требования к ней

На АЭС применяются различные растворы (кислоты, щелочи, их различные композиции и т. п.) в процессе подготовки воды, очистки и дезактивации оборудования и др., при выборе материала для необходимо учитывать химическую активность транспортируемой среды, ее химический состав, концентрацию и температуру. Различные сочетания этих параметров и скорости среды дают различные результаты по стойкости материалов, поэтому коррозионная стойкость стали в требуемых условиях должна определяться экспериментально.

На АЭС для подавляющего большинства контуров применяется арматура, изготовляемая из углеродистых, легированных или коррозионностойких сталей.

Корпусные детали арматуры малых размеров изготавливаются из проката, штамповок или поковок. Малогабаритные корпуса изделий, выпускаемых серийно (запорные вентили), изготавливаются цельноштампованными. Этим обеспечиваются высокие производительность, технологичность, механические характеристики и плотность металла.

Основными требованиями, предъявляемыми к деталям арматуры, являются прочность и долговечность, поэтому другие материалы, хотя и более дешевые, но менее надежные, чем стали, на АЭС, как правило, не применяются. Обычно материал корпусных деталей арматуры соответствует материалу трубопровода, на котором она устанавливается, поскольку основные требования к материалу трубопровода и корпусных деталей арматуры совпадают. Однако могут быть и исключения, например, для арматуры вспомогательных трубопроводов.

Арматура, предназначенная для радиоактивных теплоносителей, изготавливается из сталей, коррозионностойких в промывочных и дезактивирующих растворах.

Одним из наиболее важных факторов, определяющих условия работы и выбор материала деталей арматуры, является температура.

Трубопроводы и арматура первого контура обычно изготавливаются из коррозионностойких сталей (например, 08X18H10T), что диктуется требованиями снизить до минимума количество продуктов коррозии в теплоносителе.

Для трубопроводов и арматуры второго контура с водяным теплоносителем применяются углеродистых или низколегированных стали перлитного класса, так как параметры среды допускают применение этих сталей.

Требования к конструкционным материалам трубопроводной арматуры АЭС устанавливает ГОСТ 13901-2013, НП-068:

- материалы для изготовления арматуры должны выбираться с учетом их физико-механических, технологических характеристик и условий эксплуатации для обеспечения работоспособности в течение срока службы и соответствовать требованиям нормативной документации (НД) и техническим условиям (ТУ);
- соответствие материалов и полуфабрикатов требованиям нормативной документации (НД) и техническим условиям (ТУ) подтверждают сертификатами изготовителей. Если в сертификате указаны не все необходимые данные, то изготовитель должен выполнить контрольную проверку материала по недостающему показателю согласно НД или ТУ;

Лекция 03: Классификация сталей и сплавов (продолжение). Особенности применения

- для изготовления основных деталей арматуры 1, 2 и 3-го классов безопасности применяют материалы, разрешенные для использования на АЭС и удовлетворяющие требованиям НД. Наиболее распространенные марки сталей приведены в Приложении 3;
- в арматуре из коррозионностойкой стали в материале деталей (кроме сильфонов) площадью поверхности более 0,01 м, контактирующих с теплоносителем I контура АЭС, содержание кобальта должно быть не более 0,2%. В обоснованных случаях допускается отклонение от этой величины на основании совместного решения разработчика арматуры, проектанта станции и проектанта реакторной установки;
- материалы деталей арматуры и комплектующих изделий, которые могут быть подвергнуты дезактивации, а также их защитные покрытия должны быть коррозионностойкими к дезактивирующим растворам;
- материалы, применяемые для изготовления арматуры 4-го класса безопасности, должны соответствовать требованиям ГОСТ 33260-2015 или техническим условиям.

Порядок применения импортных материалов

При применении импортных материалов для изготовления оборудования АЭС РФ или при обратной ситуации: поставке оборудования российских материалов на зарубежные АЭС должен быть разработан документ (обоснование или пакет документов в зависимости от требований Проекта и ЕПС-контракта), устанавливающий технические требования к материалам (основным и сварочным), содержащий, как минимум, следующие разделы:

- перечень применимых на конкретном Проекте норм, правил и других действующих нормативных документов, требованиям которых должны соответствовать предполагаемые к применению материалы;
- физико-механические, технологические и коррозионные свойства основного материала и (или) металла шва или наплавленного металла;
- требования к характеристикам материалов (основных, сварочных, наплавочных), устанавливаемые действующими нормами расчетов на прочность продукции, где используются данные материалы;
- подтверждение выполнения всех требований Проекта касательно материалов
- обеспечение условий свариваемости с российскими материалами;
- обеспечение проведения дезактивации (при необходимости).

Примечание: технические требования могут уточняться и дополняться с учетом условий применения материалов.

Принципы подбора аналогов сталей

Абсолютных аналогов практически не бывает. Степень «аналогичности» неизбежно зависит от требований конечного потребителя, который и несет ответственность за выбор подходящей стали для деталей конкретного оборудования, работающего в определенных условиях. Не стоит забывать, что к одним и тем же маркам материалов могут предъявляться требования различных стандартов, которые могут отличаться, например, по содержанию примесей, размеру зерна, структуре, правилам приемки, испытаниям (как объему, так и методам).

Как же тогда сравнивать стали и подобрать аналог?

Самый простой способ – сравнение по химическому составу. Однако, металл — это не только химический состав по стандарту. Если рассматривать применительно к оборудованию, то это заготовка/полуфабрикат с необходимым уровнем свойств. И тогда нужно обратить внимание и на термообработку, и на контроль свойств.

Т.о., при сравнении отечественных и импортных сталей необходимо:

Лекция 03: Классификация сталей и сплавов (продолжение). Особенности применения

- **проанализировать рабочие условия** (рабочая температура, состав среды, давление) и требования, предъявляемые к материалу (требования заказчика, НД и т.д.) аналог, для которого необходимо подобрать;

- **определить основной критерий подбора аналога** – механические свойства или химический состав, коррозионные свойства. Часто возникает вопрос, по какому из двух критериев: механическим свойствам или химическому составу, или по обоим одновременно сравнивать конкретные марки сталей, сплавов? Поскольку углеродистые стали обычно выбирают по механическим свойствам, то главным критерием для сравнения углеродистых сталей считают предел прочности. С другой стороны, легированные стали и нержавеющие стали выбирают по их химическому составу, поэтому их разумно сравнивать именно по химическому составу. С другой стороны, некоторые высокопрочные легированные конструкционные стали целесообразнее сравнивать по пределу прочности, но с учетом их химического состава и термической обработки;

- учесть **формообразование** (поковка, отливка, прокат и т.д.) сравниваемых сталей;
- если сравнение ведется по механическим свойствам, выбрать какое из них взять основным – предел текучести, предел прочности, удлинение, ударную прочность, твердость;
- определиться по какому пределу значений ведется сравнение: минимальному, максимальному или среднему.
- учитывать распределение механических свойств по сечению изделия из данной марки стали, условия отбора образцов;

Т.о., единой методологии для сравнения сталей, конечно, не существует. Однако всегда необходимо начинать с анализа рабочих условий и требования заказчика. Например, марка стали SC 4330 по ASTM A958 имеет только один химический состав, но 13 различных классов прочности в зависимости от различных режимов термической обработки. Поэтому, если две стали аналогичны по химическому составу, то это не означает, что их можно сравнивать по механическим свойствам и наоборот.

Стали, применяемые ООО «РЭС Инжиниринг»

Обзор сталей представлен в таблице в Приложении 1.

Стали распределены по группам: углеродистые, нержавеющие, литые. представлено краткое описание, область применения и близкие зарубежные аналоги.

Приложение 1. Обзор сталей ООО «РЭС Инжиниринг»

Класс стали	Тип стали/описание	Рабочие параметры	Детали ТПА, рекомендации по применению	Близкие зарубежные аналоги
Углеродистые нелегированные				
Сталь 20 Сталь 25	Конструкционная качественная. Проста в применении, хороший уровень показателей прочности, пластичности, твердости, невысокая стоимость. Хорошая свариваемость, обрабатываемость	Т рабочей среды от минус 40 °С до 475 °С	Для корпусов, крышек, фланцев, узлов затвора. Для сварных узлов арматуры, с обязательным проведением термообработки (закалка или нормализация и высокий отпуск) при температуре рабочей среды (стенки) ниже минус 30 °С до минус 40 °С. Для крепежных деталей: - болты, шпильки, винты при Тсреды от минус 40°С до 425°С, PN до 2,5 МПа; - гайки Тсреды от минус 40 до 425, PN до 10 МПа; - плоские шайбы Тсреды от минус 40 °С до 425 °С, PN до 10 МПа	1.0402 C22 1020
22К	Конструкционная котельная перлитная. Экономична, не дефицитна. Обладает удовлетворительными механическими свойствами при комнатной и повышенных температурах (до 450 °С). Способна выдерживать большие нагрузки под давлением при температуре от минус 40 °С до 450 °С	от минус 40 до 450 °С	Сосуды под давлением (в т.ч. корпуса ВВЭР малой и средней мощности, корпуса парогенераторов, компенсаторов объема, емкостей САОЗ и др.), корпусные детали. Широко применяется в производстве котельного и иного отопительного оборудования. При минусовых температурах – при условии проведения испытания ударной вязкости	1022, 20Mn5
25Л	конструкционная нелегированная литая	от минус 40 до 450 °С	Корпусные детали, детали узла затвора. Класс II, III Т рабочей среды (стенки) от минус 30 (40) °С до 450°С, давление (PN) – без ограничений. Для деталей арматуры, эксплуатирующейся при температуре ниже минус 30 °С до минус 40 °С применяется в термообработанном состоянии: закалка + отпуск или нормализация + отпуск, с обязательным испытанием ударной вязкости	GS-45; Grade 450-240; A10; 2A; LCA

Лекция 03: Классификация сталей и сплавов (продолжение). Особенности применения

Класс стали	Тип стали/описание	Рабочие параметры	Детали ТПА, рекомендации по применению	Близкие зарубежные аналоги
			KCU-40 \geq 200 кДж/м ² (2,0 кгс·м/см ²)	
Нержавеющие				
12X13/ 20X13/ 30X13	Хромистые 12X13 – мартенсито-ферритного класса 20X13/30X13 – мартенситного класса	от минус 40 °С до 450 °С	<p>Для корпусов, крышек, фланцев, узлов затвора, шпиндели, штоки.</p> <p>Для деталей внутренних устройств арматуры, работающих в условиях атмосферной коррозии, для сред слабой агрессивности, для воды и нефтепродуктов. При температуре рабочей среды ниже минус 31 °С до минус 40 °С проводить испытание на ударный изгиб, при этом значение ударной вязкости KCU-40 \geq 300 кДж/м² (3,0 кгс·м/см²). После низкого отпуска (на высокую твердость) температура применения до 200 °С.</p> <p>20X13 для крепежных деталей:</p> <ul style="list-style-type: none"> - болты, шпильки, винты при Tсреды от минус 30 до 450, PN не регламентируется; - гайки Tсреды от минус 30 до 510, PN не регламентируется; - плоские шайбы Tсреды от минус 40 до 450, PN не регламентируется. <p>Допускается применять крепежные изделия из стали марки 20X13 на температуру ниже минус 30 °С до минус 40 °С, если при испытании на ударный изгиб образцов типа 11 по ГОСТ 9454 при температуре минус 40 °С ударная вязкость не будет ниже 300 кДж/м (3 кгс·м/см²) ни на одном из испытываемых образцов.</p> <p>Сталь 30X13 – для шайб пружинных при T от минус 60 до 250 в условиях атмосферной коррозии для сред слабой агрессивности и для воды. Не рекомендуется для сварных конструкций</p>	<p>12X13: X10Cr13 (1.4006, 403, 410, 431)</p> <p>20X13: X20Cr13 (1.4021, 420)</p> <p>30X13: X30Cr13 (1.4028, 420)</p>

Лекция 03: Классификация сталей и сплавов (продолжение). Особенности применения

Класс стали	Тип стали/описание	Рабочие параметры	Детали ТПА, рекомендации по применению	Ближайшие зарубежные аналоги
08X18H10T ГОСТ 5632	Хромоникелевая Нержавеющая аустенитного класса	от минус 270 °С до 600 °С Сильфоны: - из 08X18H10T от минус 260 °С до 465 °С, PN от 0,15 до 3,10 МПа; - из 12X18H10T от минус 260 °С до 550 °С, PN от 0,6 до 25,0 МПа либо минус 260 °С до 465 °С, PN от 0,15 до 3,10 МПа	Для корпусов, крышек, фланцев, узлов затвора, шпинделей, штоков, сильфонов. Для сварных узлов арматуры, работающих в агрессивных средах: HNO ₃ , щелочей, аммиачной селитры, пищевых сред, сред спецтехники, судовой арматуры, криогенных сред, сероводородосодержащих сред	08X18H10T: X6CrNiTi18-10 (1.4541, 1.4978, 321H)
12X18H9T 12X18H10T ГОСТ 5632	Хромоникелевая Нержавеющая аустенитного класса	от минус 270 °С до 350 °С свыше 350 °С до 610 °С	Для корпусов, крышек, фланцев, узлов затвора, шпинделей, штоков. Для сварных узлов арматуры, при отсутствии требования стойкости к межкристаллитной коррозии	12X18H9T: X10CrNiTi 18-9 (1.4541, 321) 12X18H10T: X12CrNiTi 18-9 (1.4541, 321)
10X18H12M3Л	Нержавеющая аустенитного класса Хромоникельмолибденовая литейная коррозионностойкая, кислотостойкая, жаропрочная сталь аустенитного класса. Не подвержена межкристаллитной коррозии при температуре до 800 °С	до 560 °С	Корпусные детали, трубы	GX5CrNiMoNb19-11-2, J92971
Легированные				
25X1МФ (ЭИ10)	Легированная, теплоустойчивая перлитного класса Листы ГОСТ 5520 (категории 3, 16) Сортовой прокат ГОСТ 20072 Поковки ГОСТ 8479	От минус 20 °С до 560 °С	Для корпусов, крышек, фланцев, узлов затвора. Для сварных узлов арматуры, работающих при температуре свыше 500 °С. Допускается применять крепежные изделия при температурах ниже минус 40 °С до минус 60 °С при температуре ниже минус 50 °С до минус 60 °С, если при испытании на ударный изгиб образцов типа 11 по ГОСТ 9454 при рабочих отрицательных температурах ударная вязкость не будет ниже 300 кДж/м ² (3 кгс·м/см ²) ни на одном из испытываемых образцов.	24CrMoV 5.5 (1.7733)

Лекция 03: Классификация сталей и сплавов (продолжение). Особенности применения

Класс стали	Тип стали/описание	Рабочие параметры	Детали ТПА, рекомендации по применению	Близкие зарубежные аналоги
			Для штоков и шпинделей при T свыше 500 °С.	
35ХМ	Легированная конструкционная мартенситного класса Сортовой прокат ГОСТ 4543 ГОСТ 1051	От минус 50 °С до 450 °С	Для корпусов, крышек, фланцев, узлов затвора. Для несварных узлов арматуры, с обязательным проведением термообработки (закалка и высокий отпуск) при температуре рабочей среды (стенки) ниже минус 40 °С до минус 50 °С. Допускается применять крепежные изделия при температурах ниже минус 40 °С до минус 60 °С при температуре ниже минус 50 °С до минус 60 °С, если при испытании на ударный изгиб образцов типа 11 по ГОСТ 9454 при рабочих отрицательных температурах ударная вязкость не будет ниже 300 кДж/м ² (3 кгс·м/см ²) ни на одном из испытываемых образцов	34CrMo4 (1.7220)
06Х13Н7Д2	Легированная высокохромистая аустенитно-мартенситного класса (мартенситностареющая), жаропрочная Крепежные изделия ГОСТ 23304-78 Сортовой прокат ТУ 14-1-3613-83	До 300	Крепежные детали турбин и фланцевых соединений реакторов, парогенераторов, сосудов, паропроводов и аппаратуры. Рекомендуется для шпилек и болтов применять сталь, гаек и плоских подкладных шайб применять сталь с КП 805	-
Сплавы				
ХН35ВТ(-ВД) (ЭИ 612-ВД) * ВД- вакуумно-дуговой переплав Вакуумно-дуговой переплав – это вторичный процесс плавки для получения металлических слитков с	Жаропрочный сплав на никелевой основе ГОСТ 5632 ХН35ВТ ТУ 14-1-272 ХН35ВТ-ВД ТУ 14-1-1665	От минус 100 °С до 650 °С	Крепежные детали: - болты, шпильки, винты при Tсреды от минус 70 °С до 650 °С, PN не регламентируется; - гайки Tсреды от минус 70 °С до 650 °С, PN не регламентируется. Шпиндели, штоки. Применяется для работы при температуре выше 600 °С. Для деталей с высокими требованиями по плотности и для изготовления тренированных шпилек применяется ХН35ИТ-ВД	-

Лекция 03: Классификация сталей и сплавов (продолжение). Особенности применения

Класс стали	Тип стали/описание	Рабочие параметры	Детали ТПА, рекомендации по применению	Близкие зарубежные аналоги
повышенной однородностью по химическому составу и механическим свойствам для высокотехнологичных применений			и для изготовления тренированных шпилек применять сталь марки ХН35ВТ-ВД	

Приложение 2: Общие требования, предъявляемых к арматуре АЭС

Общие требований, предъявляемых к арматуре АЭС

1. Прочность и жесткость - способность выдерживать без существенных упругих и пластических деформаций, нарушающих нормальную работу изделия, постоянные и кратковременные давления, усилия и крутящие моменты.
2. Долговечность - способность в течение определенного, заранее заданного срока выполнять свои функции с заданной вероятностью до первого отказа либо с допустимой интенсивностью отказов.
3. Коррозионная стойкость по отношению к рабочей среде.
4. Циклическая долговечность - способность выполнять с заданной вероятностью заранее заданное число циклов срабатывания до первого отказа.
5. Герметичность внешняя и внутренняя, т. е. герметичность по отношению к внешней среде и герметичность перекрытия затвором разделяемых арматурой участков трубопровода. среды (воды, пара, масла, сжатого воздуха).
6. Применение требуемого типа привода, вида энергии и управляющей
7. Обеспечение заданной скорости срабатывания - перекрытия прохода.
8. Возможность монтажа в требуемом положении
9. Заданный способ присоединения к трубопроводу (сваркой, фланцами).
10. Простота и удобство управления - возможность управления арматурой вручную с применением установленных усилий и при удобном для оператора положении.
11. Технологичность конструкции - возможность изготовления ее при минимальных затратах труда и средств.
12. Ремонтопригодность - возможность восстанавливать работоспособность арматуры при минимальных затратах времени, труда и средств.
13. Минимальная материалоемкость и масса конструкции. Дополнительно к этим основным требованиям и в уточнение некоторых из них к арматуре могут предъявляться дополнительные требования, которые имеют разное значение в зависимости от условий ее работы.
14. Вакуумная плотность.
15. Эрозионная стойкость материала деталей затвора и седла, а также проточной части корпуса.
16. Наличие дублирующего ручного привода.
17. Наличие местного указателя положения затвора у арматуры с ручным местным и дистанционным управлением.
18. Наличие сигнализаторов крайних положений затвора у арматуры, управляемой дистанционно.

19. Возможность регулировки продолжительности цикла закрывания или открывания
20. Возможность установки затвора в любом промежуточном положении.
21. Необслуживаемость, т. е. способность арматуры к выполнению своих функций без проведения технического обслуживания, ремонта, регулировки, периодической смазки и т.п. (эксплуатация в необслуживаемых помещениях герметизированной зоны под защитной оболочкой).
22. Отсутствие вибрации и минимальный уровень шума.
23. Отсутствие легирующих металлов, нежелательных по своим активационным свойствам (кобальта и др.).
24. Обеспечение надежного функционирования после продолжительного периода нахождения арматуры в закрытом или открытом положении.
25. Дренируемость, т. е. возможность выпуска рабочей среды из полостей арматуры.
26. Возможность выпуска воздуха при заполнении арматуры рабочей средой.
27. Отсутствие застойных зон и полостей, труднодоступных для очистки и промывки.
28. Возможность дистанционного демонтажа и монтажа арматуры для замены вышедшего из строя изделия.
29. Требуемый уровень чистоты внутренних полостей.
30. Возможность промывки и дезактивации соответствующими растворами наружных и внутренних поверхностей конструкции и т. п. А
31. Арматура должна быть надежной и безопасной в эксплуатации в течение проектного срока службы; должна быть предусмотрена возможность осмотра, контроля основного металла и сварных соединений неразрушающими методами дефектоскопии, проведения очистки, промывки, продувки и ремонта. Если по условиям размещения оборудования и трубопроводов или радиационной обстановки контроль за состоянием металла в местах, установленных НП-089, не может быть выполнен существующими средствами, то должны быть предусмотрены специальные устройства и приспособления, обеспечивающие осуществление указанного контроля.
32. Все элементы оборудования и трубопроводов с температурой наружной стенки выше 45°C, расположенные в доступных для обслуживающего персонала местах, должны быть теплоизолированы, температура наружной поверхности теплоизоляции не должна превышать 45° С. На участках, подлежащих в процессе эксплуатации контролю и измерению деформации металла, должна быть установлена съемная изоляция. Арматура должна размещаться в местах, удобных для обслуживания и ремонта. В необходимых случаях должны быть устроены лестницы и площадки. Арматура, требующая для управления значительных усилий или дистанционного обслуживания, должна иметь механические или электрические приводы.

Лекция 03: Классификация сталей и сплавов (продолжение). Особенности применения

Приложение 3: Рекомендуемые марки сталей для деталей оборудования в т.ч. трубопроводной арматуры

Таблица – Рекомендуемые марки сталей для деталей оборудования в т.ч. трубопроводной арматуры

Наименование	Теплоноситель		Материал		
	Давление рабочее, МПа	Температура рабочая, °С	Корпусные детали	Шпиндели, штоки, плунжеры, золотники	Наплавки уплотнительных колец
Пар, техническая вода	6,4	350	20, 20Л (III), 25Л (II), 25Л (III), 22К	35, 20Х13	ЦН-6, ЦН-6Л, ЦН-6М, ЦН-12М
	10,0	510	20ХМЛ	ХН35ВТ	-
	22,5	565	12Х1МФ	ХН35ВТ	
	23,0	600	10Х18Н9ТЛ 08Х18Н10Т	08Х18Н10Т ХН35ВТ	ВЗК
Дистиллят, пароводяная смесь, азот, воздух, дистиллят с примесью борной кислоты до 35 мг/л	22,5	350	10Х18Н9ТЛ 08Х18Н10Т 10Х18Н12М2ТЛ	08Х18Н10Т ХН35ВТ 10Х17Н13М2Т	ВЗК, ЦН-6, ЦН-6М, ЦН-6Л, ЦН-12М
Гелий	10,0	600	12Х18Н9Т 08Х18Н10Т	12Х18Н9Т 08Х18Н10Т ХН35ВТ	ВЗК
	12,0	750	ХН60В ХН70ВМЮТ	ХН60В ХН70ВМЮТ	-