



АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ  
РОСАТОМ

# Материаловедение

## Лекция 3: Общая классификация сталей и сплавов (продолжение). Особенности применения

Семенова Елена  
Инженер-проектировщик 1 категории

22.10.2024

# Сплавы. Чугун



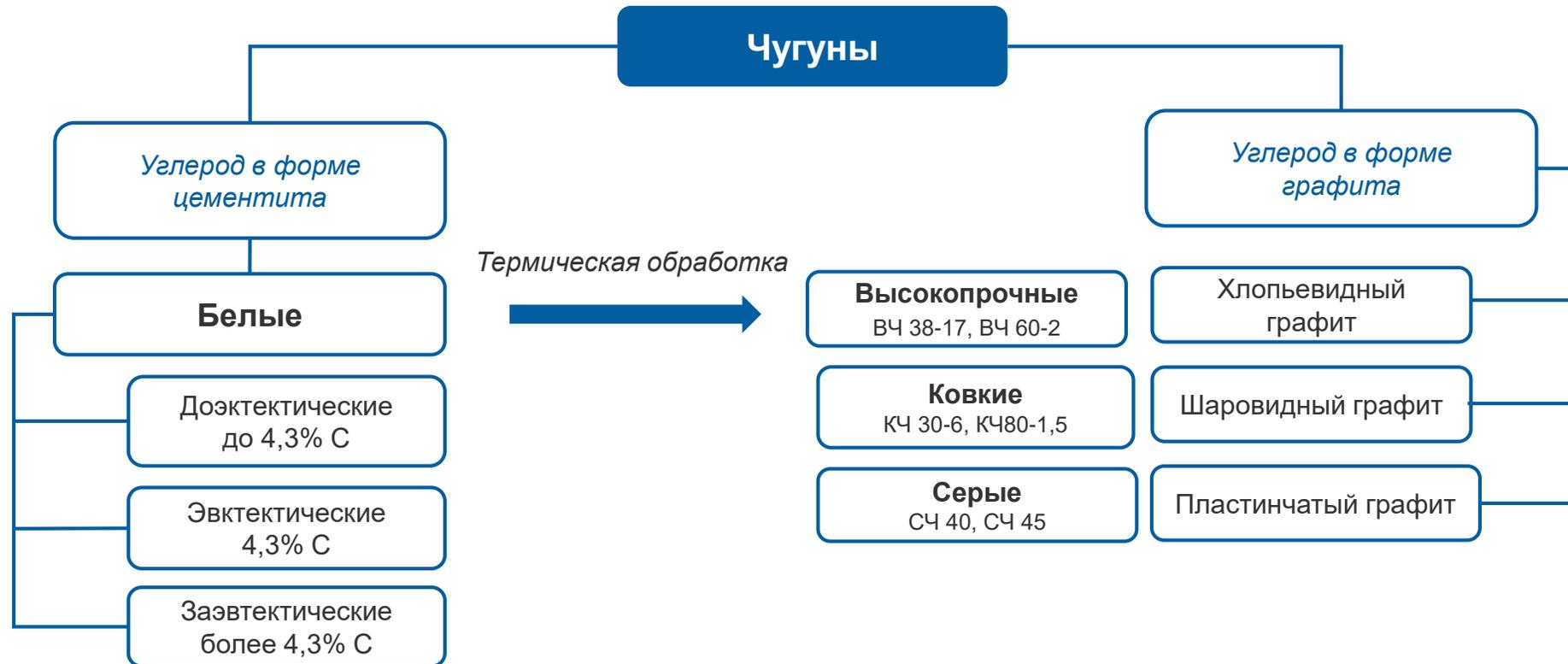
**Чугун** — сплав железа с углеродом ( $2,14 \div 6,67$  %, обычно  $3 \div 4,5$  %), содержащий постоянные примеси (кремний, марганец, фосфор, сера) и легирующие элементы (хром, никель, ванадий, алюминий и др.).

- Чугуны мало пластичны, не прокатываются и не куются
- Чугуны обладают пониженной температурой плавления и хорошими литейными свойствами
- Чугун долговечен, прост в утилизации
- Чугун – хрупкий материал, обладает плохой свариваемостью. Технология сварки чугуна довольно сложна, большой риск возникновения дефектов
- Массивность изделий. Сложно изготавливать тонкостенные конструкции, стенки которых могут не выдержать собственного веса
- Окисляемость. Легко ржавеет во влажной среде, поэтому детали, которые используются на открытом воздухе, необходимо защищать от коррозии
- Хорошо работают на износ, хорошие антифрикционные свойства
- Хорошие литейные свойства
- Высокая теплопроводность

По структуре различают:

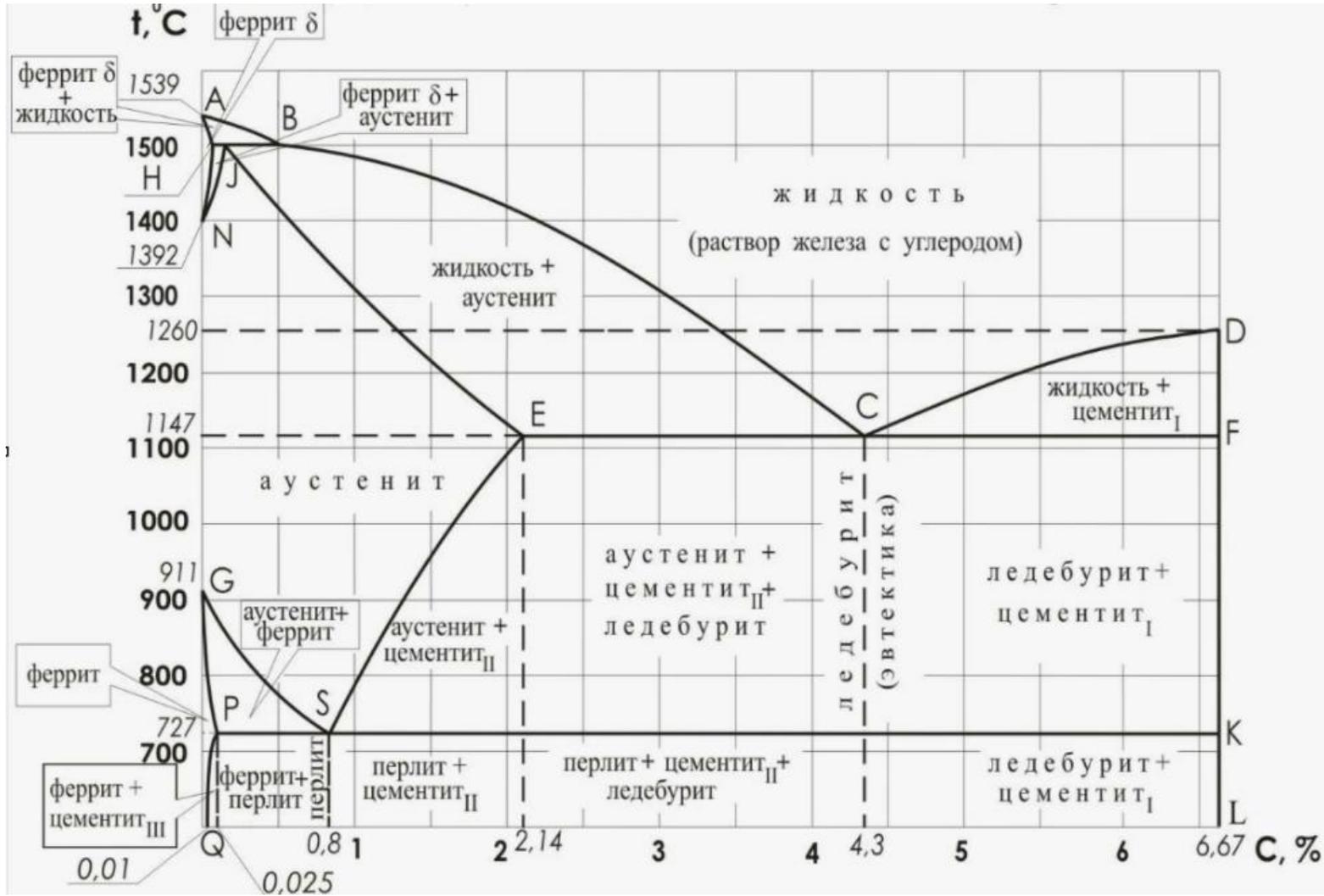
- серый чугун (СЧ)
- белый чугун (БЧ)
- половинчатый отбеленный чугун
- ковкий чугун (КЧ)
- высокопрочный чугун (ВЧ)

# Чугун. Классификация



Графит – углерод, выделяющийся в сплавах Fe-C в свободном состоянии  
Цементит – карбид железа  $Fe_3C$

# Чугун. Структура



# Сплавы. Чугун



**Белый чугун (БЧ)/передельный.** Углерод в его структуре практически полностью связан, находится в виде цементита. На изломе он белый и блестящий. Обладает очень **высокой твердостью, большой хрупкостью и с трудом поддается обработке**. Белые чугуны имеют большую твердость, хрупкость и не используются для изготовления деталей машин. Основное назначение белого чугуна — это переработка на ковкий чугун.

**Половинчатые отбеленные чугуны.** Промежуточный вид между БЧ и СЧ. В составе чугуна  $2,8 \div 3,6$  % углерода, и пониженное содержание кремния –  $0,5 \div 0,8$ %. В отливке в верхнем слое он белый, в тоже время в сердцевине он серый. Содержащийся в нем углерод представлен в виде графита и карбида приблизительно в равных долях. Он прочен, но в тоже время **легче поддается обработке, менее хрупок**

**Серый чугун (СЧ).** Содержание углерода в составе обычно составляет 3,5%. Графит в виде хлопьевидных, пластинчатых или волокнистых включений. Прочный, достаточно износостойкий, хорошо поддается обработке. Из серого чугуна изготавливают детали, работающие при отсутствии ударной нагрузки.

**Ковкий чугун (КЧ).** Мягкий и вязкий, в состав входит 14% кремния, 1% марганца. Углерод в виде графита хлопьевидной формы. 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 форме графита шаровидной формы. Получают путем добавок 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

# Чугун. Маркировка



Маркировка чугуна **буквенно-цифровая**: она содержит буквы, указывающие вид чугуна (СЧ, ВЧ, КЧ: серые, высокопрочные и ковкие чугуны), и цифры, определяющие уровень механических свойств

- Серые чугуны. Цифра в маркировке соответствует минимально допустимому значению временного сопротивления разрыву (в МПа·10<sup>-1</sup>): СЧ15 ( $\sigma_{0,2}=150$  МПа), СЧ25 ( $\sigma_{0,2}=250$  МПа)
- Высокопрочные чугуны. Цифра в маркировке соответствует минимальному значению временного сопротивления разрыву (в МПа·10<sup>-1</sup>): ВЧ40 ( $\sigma_{0,2}=400$  МПа)
- Ковкие чугуны. Первая цифра соответствует минимальному значению предела прочности при растяжении (в МПа·10<sup>-1</sup>), вторая цифра — относительному удлинению (в %): КЧ 30 –6 ( $\sigma_{0,2}=300$  МПа,  $\delta = 6\%$ )

# Цветные металлы и сплавы. Сплавы титана. Основные факты



Сплавы цветных металлов применяются для изготовления деталей, работающих в условиях агрессивной среды, подвергающиеся трению, требующих высокую теплопроводность, электропроводность, при наличии ограничений по массе

Для цветных сплавов характерны:

- определенная окраска
- высокая пластичность
- малая твердость
- относительно низкая температура плавления

**Титан** — металл серебристо-белого цвета, имеет плотность 4,5 г/см<sup>3</sup>, температуру плавления 1668 °С. Свойства титана сильно зависят от чистоты. В титане **удачно сочетаются хорошая пластичность и механическая прочность с высокой коррозионной стойкостью** во многих агрессивных средах. Титан намного легче стали

Титан **хорошо куется и сваривается** (в среде защитных газов), хорошо **обрабатывается давлением, легко прокатывается штампуется**, однако **плохо обрабатывается резанием**, имеют **низкую теплопроводность**.

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. Упрочнение титана достигается наклепом, легированием, термической обработкой. Для повышения износостойкости и задиростойкости титановые сплавы подвергают азотированию, цементации или оксидированию.

Технический титан маркируется буквами и цифрами: ВТ1-00 (95,53 %Ti), ВТ1-0 (99,48% Ti), ВТ1-1 (99,44% Ti). Чем меньше нулей в обозначении титана, тем больше содержится в нем примесей, которые оказывают сильное влияние на механические и другие свойства.

Для получения сплавов титан легируют: **алюминием, марганцем, хромом, молибденом, ванадием** и др.

По удельной прочности сплавы титана превосходят все известные технические сплавы. Поэтому сплавы титана применяют для изготовления изделий, работающих при значительных нагрузках и высокой температуре

# Цветные металлы и сплавы. Сплавы титана



Титан является металлом, имеющим полиморфные превращения, и существует в двух аллотропических формах:  $\alpha$  и  $\beta$ .

По структуре различают:

- $\alpha$ -сплавы (не упрочняются термообработкой: ВТ1-00, ВТ5, ВТ 5-1);
- $\beta$ -сплавы (упрочняемые термообработкой: ВТ32, ВТ15);
- ( $\alpha + \beta$ )-сплавы (упрочняемые термообработкой: ВТ3-1, ВТ6, ВТ8, ВТ14 и т.д.)

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

**Титановые сплавы с  $\alpha$ -структурой** (основной л.э. – Al) до температуры 650 °С сохраняют достаточно высокую прочность и до 1090 °С – коррозионную стойкость в атмосфере, загрязненной газами. Хорошо свариваются. Пластичность при изгибе хуже, чем у  $\beta$ -сплавов. Недостатками также являются невозможность получения высокопрочных сплавов и невосприимчивость к закалке и старению.

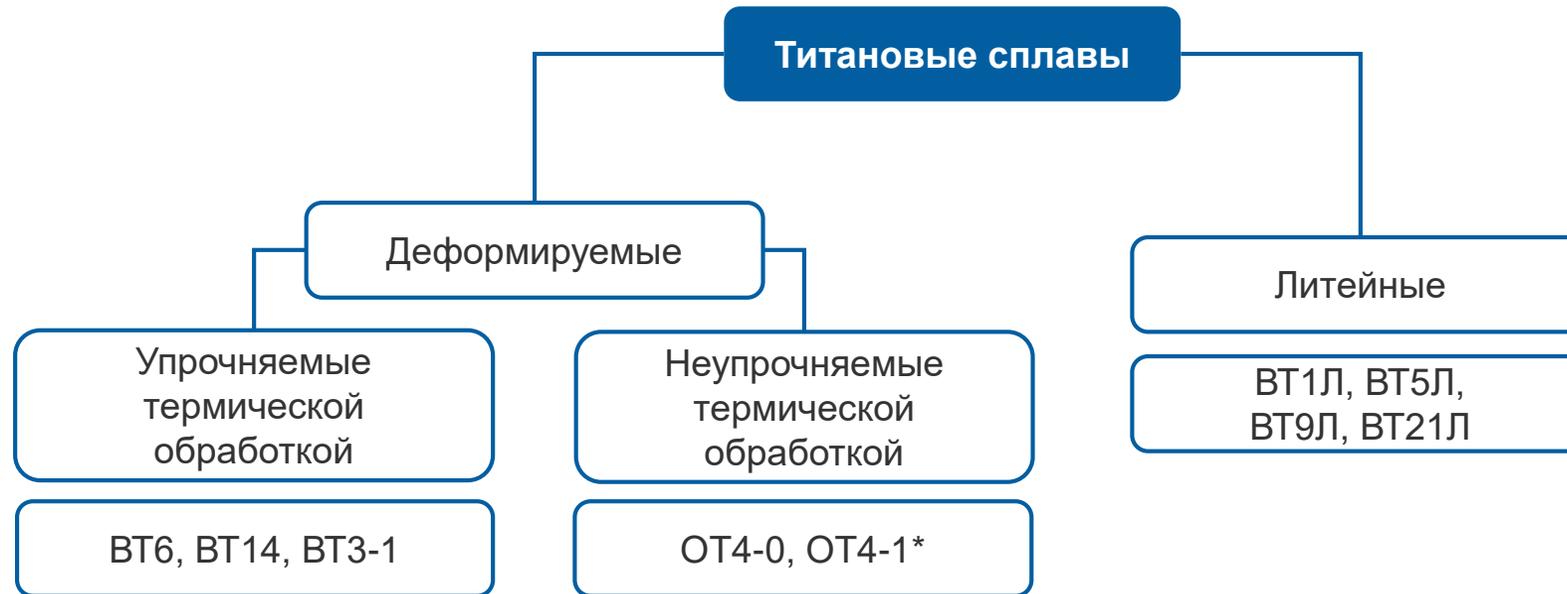
**Сплавы с  $\beta$ -структурой** имеют очень высокую прочность, хорошую пластичность, сохраняют достаточно высокую прочность до 540 °С, упрочняются термической обработкой. Очень чувствительны к загрязнению атмосферными газами при температурах выше 700 °С, часто охрупчиваются при старении. Не нашли широкого промышленного применения. Недостатками этих сплавов являются плохая свариваемость, высокая стоимость из-за необходимости легирования дорогостоящими элементами (V, Mo, Nb, Ta).

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

# Сплавы титана. Классификация



Титановые сплавы классифицируют по технологии производства (деформируемые, литейные) или по механическим свойствам (обычной прочности, высокопрочные, жаропрочные и др.)



\* - псевдо- $\alpha$ -сплавы, имеют в основном  $\alpha$ -структуру и небольшое количество  $\beta$ -фазы (1÷5 %) вследствие дополнительного легирования марганцем

# Сплавы титана. Деформируемые неупрочняемые термообработкой



# Сплавы титана. Деформируемые упрочняемые термообработкой



АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ  
РОСАТОМ

Деформируемые сплавы упрочняемые термической обработкой обладают высоким предел прочности: свыше более 1000 МПа

Упрочняющей термообработка: закалка и последующее старение

Наряду с высокой прочностью и коррозионной стойкостью деформируемые сплавы сохраняют хорошую или удовлетворительную пластичность в горячем состоянии, обладают удовлетворительной свариваемостью, но плохо обрабатываются резанием

Марки: ВТ6, ВТ14, ВТ3-1

# Литейные сплавы титана



- Литейные сплавы обладают **высокой жидкотекучестью, малой склонностью газовой пористости, малую усадку**
- По сравнению с деформируемыми литейные сплавы **имеют меньшую прочность, пластичность выносливость**, но существенное и их преимущество – низкая стоимость
- В случае работы при повышенной температуре отливки обладают более высокой жаропрочностью и сопротивлением ползучести
- Термическая обработка литейных титановых сплавов включает в себя в основном только отжиг, для снятия остаточных напряжений проводят для всех сплавов неполный отжиг при 600 °С и для некоторых видов титановых сплавов проводят полный отжиг при различных температурах
- Из-за активного взаимодействия титана с газами и формовочными материалами необходимо производить их плавку и разливку в вакууме или в среде нейтральных газов
- Для фасонного литья применяют сплавы ВТ5Л, ВТ14Л и ВТ3-1Л, химический состав которых в основном совпадает с химическим составом аналогичных деформируемых сплавов. Наилучшими технологическими свойствами обладает литейный сплав ВТ5Л, имеющий достаточно высокую прочность и ударную вязкость. Фасонные отливки из сплава ВТ5Л работают при температуре до 400°С

# Сплавы титана. Титановые сплавы, применяемые в арматуростроении



Марка сплава	Состояние материала	σ <sub>T</sub> , МПа	σ <sub>B</sub> , 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
ПТ-ЗВ	Поковки, прутки, листы Сортовой прокат	590	635	11	26
BT 5-1	Поковки, прутки, листы	-	735	6	12

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**

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

# Сплавы титана. Атомная энергетика

## Параметры применения титановых сплавов



Марка сплава	Температура, °С (для арматуры кроме АС)	Температура, °С (для арматуры АС)
BT1-00	от минус 269 до 300	-
BT1-0		до 250
OT4	от минус 196 до 400	до 400
OT4-0		-
ЗМ	до 350	до 350
ПТ-ЗВ		
5В	до 500	-
BT5-1		до 500
BT 16	до 500*	до 250

\* Свыше 250 °С применяется в отожженном состоянии.

### Нормативная документация

- ТУ 1825-582-075110017-2005. Прутки катаные из титанового сплава марки BT 16 для атомной энергетики. Технические условия
- ТУ 1825-566-07510017-2005. Листы и плиты из титана марок BT1-00, BT1-0 и титановых сплавов марок OT4-1В, ПТ-ЗВ, BT6с, BT 6. Технические условия
- ТУ 1825-585-07510017-2004. Прутки кованые из титановых сплавов марок BT1-00, BT1-0, ПТ ЗВ. BT 6, OT4-1В. Технические условия
- ТУ 1825-571-07510017-2005. Прутки катаные из титана марок BT1-00, BT1-0 и титановых сплавов марок OT4-1В, ПТ-ЗВ, ЗМ и BT6. Технические условия

# Титан и титановые сплавы. Маркировка



В соответствии с ГОСТ 19807-91 титан и титановые сплавы обозначаются буквами ВТ, ОТ, ПТ (буквы В, О, П – идентификатор организации-разработчика или производителя, Т — титан) и цифрами, указывающими порядковый номер сплава в зависимости от химического состава.

В – ВИАМ титан — Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов (ВИАМ, г. Москва);

О – Опытный титан — совместная разработка ВИАМ и Верхнесалдинского металлургического производственного объединения (ВСМПО, г. Верхняя Салда, Свердловская область);

П – Прометей титан — ЦНИИ КМ «Прометей» (г. Санкт-Петербург).

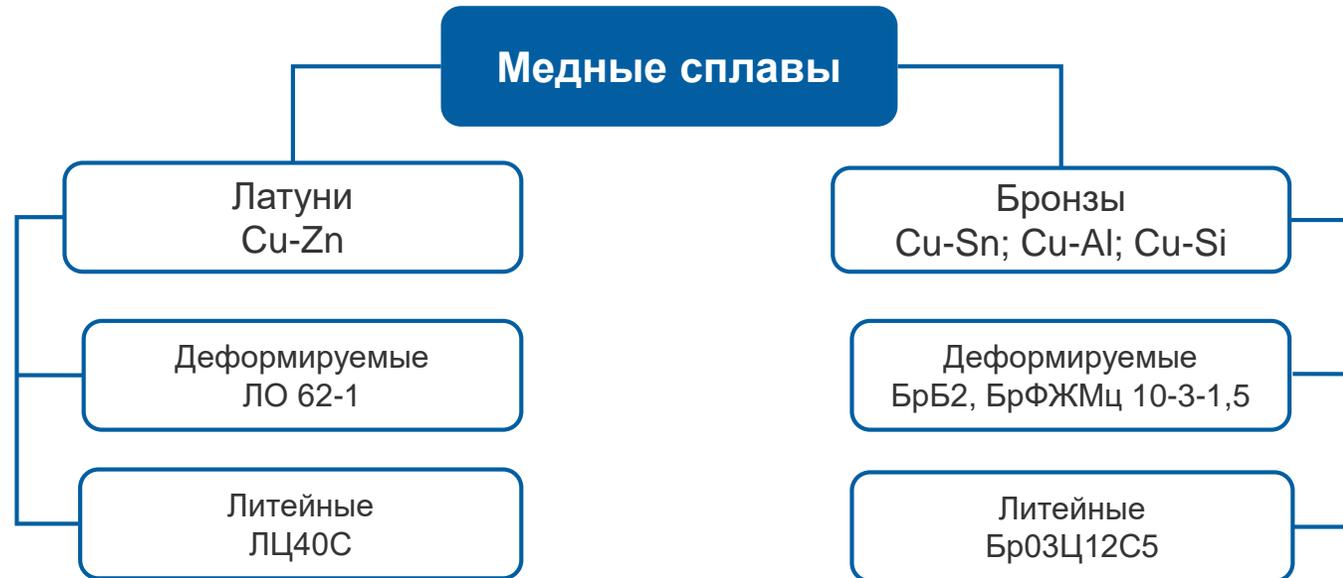
Кроме общего разделения, сплавам Ti присваиваются другие специальные обозначения. Они соответствуют составу и параметрам:

- технический титан маркируется буквами и цифрами: ВТ 1-00 (95,53 % Ti), ВТ1-0 (99,48 % Ti), ВТ1-1 (99,44 % Ti). Чем меньше нулей в обозначении титана, тем больше содержится в нем примесей, которые оказывают сильное влияние на механические и другие свойства. Небольшое содержание кислорода, азота и углерода повышает твердость и прочность титана, но при этом снижает пластичность, коррозионную стойкость и ухудшает свариваемость и обрабатываемость давлением
- титановые губки ТГ-90, ТГ-110, ТГ-150, ТГ-120, ТГ-Тв, ТГ-130, ТГ-100;
- литейные — ВТ20Л, ВТ21Л, ВТ14Л, ВТ9Л, ВТ6Л, ВТ1Л, ВТ3-1Л, ВТ5Л.

В некоторых случаях после порядкового номера сплава ставится дополнительная буква:

- У – улучшенный,
- М – модифицированный,
- И – специального назначения,
- В – с преобладанием ванадия в качестве легирующего элемента.

# Медные сплавы. Классификация



# Медные сплавы. Особенности



**Латунь** – сплав меди с цинком (от 10% до 40%), хорошо поддается холодной прокатке, штамповке, вытягиванию. Латунь обладает коррозионной стойкостью в обычной атмосфере, а также в условиях морского климата. Сильное корродирующее действие на латунь оказывает сероводород. При этом латунь с повышенным содержанием цинка (более 30%) более устойчива в среде сероводорода, чем латунь с низким содержанием цинка.

Латунь подвержена особым видам коррозии:

- **обесцинкование** – это особая форма коррозии, при которой происходит растворение поверхностных слоев латунного изделия в реагенте. Процесс обесцинкования наблюдается при контакте латуни с электропроводящими средами (кислые и щелочные растворы). В результате обесцинкования латунь становится пористой, на поверхности появляются красные пятна.
- **коррозионное растрескивание («сезонное»)** - это явление, при котором в изделиях (в обработанном материале) спонтанно из этого сплава возникают трещины при вылеживании или эксплуатации. Склонность к коррозионному межкристаллитному растрескиванию усиливается с увеличением (свыше 15%) содержание цинка

**Бронза** – сплав меди с оловом (до 10 %), алюминием, марганцем, свинцом и другими элементами. Обладает хорошими литейными свойствами. Из нее изготавливают вентили, краны, задвижки и другие литые изделия.

Бронза отличается значительной коррозионной стойкостью. Олово повышает эти свойства, а свинец ухудшает.

Бронза обладает рядом уникальных механических свойств, которые делают ее ценным материалом в различных отраслях:

- **Прочность:** Бронза хорошо справляется с нагрузками и обладает высокой прочностью и твердостью. Олово, добавленное в бронзу, придает ей дополнительную твердость, что делает ее устойчивой к износу и идеальной для использования в подшипниках и механизмах.
- **Коррозионная стойкость:** Бронза обладает хорошей коррозионной стойкостью, что делает ее подходящей для использования в морских условиях и в агрессивных окружающих средах
- **Теплопроводность:** Бронза является хорошим теплопроводником, что позволяет использовать ее в производстве оборудования для теплопередачи
- **Электропроводность:** Медь, входящая в состав бронзы, обладает отличной электропроводностью, поэтому бронза часто используется в электрических приборах и проводах
- **Хорошая обрабатываемость**

# Маркировка цветных сплавов



Медные сплавы обозначают начальными буквами их названия (Бр или Л), после чего следуют первые буквы названий основных элементов, образующих сплав, и цифры, указывающие количество элемента в процентах. Приняты следующие обозначения компонентов сплавов:

- А – алюминий Мц - марганец С - свинец Б - бериллий
- Мг – магний Ср – серебро Ж - железо Мш - мышьяк
- Су – сурьма К – кремний Н – никель Т – титан
- Кд – кадмий О – олово Ф – фосфор Х – хром
- Ц - цинк

Примеры:

БрА9Мц2Л - бронза, содержащая 9% алюминия, 2% Мп, остальное Сu ("Л" указывает, что сплав литейный);

ЛЦ40Мц3Ж - латунь, содержащая 40% Zn, 3% Мп, ~1% Fe, остальное Сu;

Бр0Ф8,0-0,3 - бронза наряду с медью содержащая 8% олова и 0,3% фосфора;

ЛАМш77-2-0,05 - латунь содержащая 77% Сu, 2% Al, 0,055 мышьяка, остальное Zn (в обозначении латуни, предназначенной для обработки давлением, первое число указывает на содержание меди).

В несложных по составу латунях указывают только содержание в сплаве меди:

Л96 - латунь содержащая 96% Сu и ~4% Zn (томпак);

Л63 - латунь содержащая 63% Сu и ~37% Zn.

# Конструкционные материалы оборудования АЭС. Особенности применения



АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ  
РОСАТОМ

**Правильный выбор** конструкционных материалов и **сохранение их свойств в процессе длительной эксплуатации** является одним из основных критериев, определяющих надежную и долговечную работу оборудования и трубопроводов АЭС

При выборе конструкционных материалов для оборудования АЭС, помимо общих критериев, необходимо принимать во внимание следующие основные условия:

- напряжения от механической нагрузки, которые в первую очередь определяются давлением рабочей среды при заданных геометрических формах и размерах элементов оборудования
- число и величину циклических изменений механических нагрузок и теплосмен
- нейтронное облучение
- рабочую температуру, состав среды
- влияние рабочей среды на коррозию и коррозионно-механическую прочность материалов

## Применяемые материалы должны:

- обеспечить конструкционную прочность элементов/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 малоцикловой, и должны обладать высокой циклической прочностью
- качество и свойства основных материалов (полуфабрикатов и заготовок) должны удовлетворять требованиям соответствующих стандартов и технических условий и должны быть подтверждены сертификатами заводов-поставщиков. 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

# Конструкционные материалы оборудования АЭС



Конструкционный материал	Область применения	Максимальная Т рабочая, °С
<b>Аустенитные нержавеющие стали</b>	Оболочка ТВЭЛов, технологические каналы, трубопроводы первого контура, поверхность парогенераторов, насосы, ТПА	700
<b>Перлитные низколегированные стали</b>	Паропроводы перегретого пара одноконтурных реакторных установок, парогенераторов и корпуса реакторов, ТПА	500
<b>Углеродистые стали</b>	Паропроводы насыщенного пара одно и двухконтурных реакторных установок, трубопроводы конденсатно-питательного тракта	350
<b>Нержавеющие стали с добавками бора</b>	Стержни системы управления и защиты	600
<b>Циркониевые сплавы</b>	Оболочки ТВЭЛов, кассеты и технологические каналы реакторов, охлаждаемых водой и жидкими металлами	400
<b>Алюминиевые сплавы</b>	Оболочки ТВЭЛов и технологические каналы водоохлаждаемых реакторов	250
<b>Магнитные сплавы</b>	Оболочки ТВЭЛов, охлаждаемые углекислым газом	400
<b>Титановые сплавы</b>	Поверхность нагрева парогенераторов водоохлаждаемых реакторов	400
<b>Никелевые сплавы</b>	Промежуточные теплообменники реакторов с жидкометаллическими теплоносителями, поверхность нагрева парогенераторов и регенеративных подогревателей	800
<b>Тугоплавкие металлы и их сплавы</b>	Оболочки ТВЭЛов и другие узлы первого контура	1000+1500
<b>Медные сплавы</b>	Поверхности нагрева регенеративных подогревателей, конденсаторов и вспомогательных теплообменников	200

Во время контроля элементов конструкций АЭС дефекты могут быть выявлены на всех без исключения элементах оборудования, независимо от марки стали, технологии изготовления, места на конструкции и срока эксплуатации

# Основные служебные свойства конструкционных материалов оборудования АЭС



АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ  
РОСАТОМ

Основные характеристики материала, обеспечивающие возможность применения в энергетическом оборудовании:

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

**Механическая прочность** – 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** – 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** – способность материала выдерживать без разрушения ударные нагрузки (механические или термические). Ударная вязкость используют для оценки вязкости. Иногда под вязкостью понимают сочетание высокой механической прочности и большой пластичности материала.

**Жаростойкость** – сопротивление металла окислению при высоких температурах

# Основные служебные свойства конструкционных материалов оборудования АЭС



**Жаропрочность** – способность металлов и сплавов длительно работать без разрушения под воздействием внешних нагрузок и повышенных температур. Основными показателями, характеризующими жаропрочность материала, являются предел длительной прочности и сопротивление ползучести при высоких температурах.

Определяющей характеристикой жаропрочных сталей 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

**Ползучесть** – необратимое деформирование материала при постоянной нагрузке (напряжении) и температуре. Если деталь в течение промежутка времени выдерживает определенную нагрузку при высокой температуре, в нем начинает происходить пластичная деформация, которая со временем приводит к разрыву, даже если нагрузка меньше предела текучести металла

**Усталость материалов** – 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

**Коррозионная стойкость** — способность материалов сопротивляться коррозии

# Конструкционные материалы оборудования АЭС. Особенности применения



	Жаропрочность	Коррозионная стойкость в паровой среде	Коррозионная стойкость в среде продуктов сгорания топлив	Усталостная прочность	Вязкость	Пластичность	Технологичность при изготовлении элементов оборудования	Свариваемость
Поверхности нагрева	+	+	+	-	-	+	+	+
Трубопроводы пара	+	+	-	+	+	+	+	+
Ротор паровой турбины	+	+	-	+	+	+	+	+*
Лопатки паровой турбины	+	+	-	+	+	+	+	+*
Литые элементы корпусного оборудования	+	+	-	+	+	+	+	+

Основным расчетным критерием, определяющим выбор материала для паропроводного и турбинного оборудования, предназначенного для работы при повышенных температурах, вызывающих ползучесть, в соответствии с действующей инженерной практикой является **уровень длительной прочности и предел ползучести за ресурс  $1 \times 10^5$  и  $2 \times 10^5$  часов при рабочих температурах**. При этом материал должен обладать **высокой пластичностью и вязкостью, удовлетворительной коррозионной стойкостью в пароводяной среде** (для поверхностей нагрева), высокой технологичностью (при выплавке, ковке, горячей деформации, сварке и термообработке).

Для толстостенных элементов оборудования (коллекторов, паропроводов, роторов турбин и т.п.) также важен необходимый уровень вязкости основного металла и сварных соединений для предотвращения опасности хрупких разрушений в условиях пусков оборудования и проведение гидроиспытаний.

В отдельных случаях необходимо учитывать специфические условия работы материалов, вызывающие потребность в расширении требований оценки соответствующих свойств, как стали, так и ее сварных соединений: при циклических нагрузках – оценку циклической прочности, при активном воздействии среды – оценки коррозионно-механической прочности и др.

# Особенности сталей, применяемых в АЭ



## Перлитные стали – как заменитель нержавеющей

- содержание (0,08 ÷ 0,4) %С. Суммарное содержание легирующих элементов не превосходит (5 ÷ 6) %
- применяются в качестве замены сталей аустенитного класса
- к данному классу относятся теплоустойчивые низколегированные стали с содержанием углерода (0,13 ÷ 0,18) %, хрома (2,5 ÷ 3,0) %, молибдена (0,6 ÷ 0,8) % и ванадия (0,25 ÷ 0,35) % , например, сталь **15Х2МФА, 15Х1МФ**

## Коррозионностойкие стали

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

- хромоникелевые стали на базе классической композиции 18-8, имеющие в основном аустенитную структуру
- хромистые стали без никеля или с небольшими присадками этого элемента, имеющие мартенситную или мартенситно-ферритную структуру

Трубопроводы и арматура первого контура обычно изготавливаются из коррозионностойких сталей (например, 08Х18Н10Т), что диктуется требованиями снизить до минимума количество продуктов коррозии в теплоносителе.

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

# Особенности сталей, применяемых в АЭ.

## Хромоникелевые стали



АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ  
РОСАТОМ

Хромоникелевые стали в воде первого контура имеют скорость общей коррозии не более 0,001-0,002 мм/год. Обладают хорошей свариваемостью, невысокой прочностью при хорошей пластичности и высокой вязкости. Опасность хрупких разрушений конструкций из этих материалов практически отсутствует

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**

Для АЭС с водоохлаждаемыми реакторами получили применение хромоникелевые стали типа 18-8, стабилизированные титаном. Хромоникелевые сплавы подвержены коррозионному растрескиванию и МКК. 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

Циклическая прочность, определенная для исходного состояния, также может рассматриваться как стабильная характеристика вплоть до максимального облучения потоками быстрых нейтронов

**!** 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. Этих незначительных количеств кобальта оказывается достаточно для серьезного ухудшения радиационной обстановки. Через месяц после останова основной вклад в активность оборудования I контура вносят радиоизотопы кобальта

# Особенности сталей, применяемых в АЭ.

## Хромистые стали



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. 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 состояниях различается незначительно, однако отпуск при промежуточных значениях температуры может приводить к двухкратному 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 ударную вязкость. 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**.

Сопротивление усталости при малоцикловом нагружения высоко отпущенных хромистых нержавеющей сталей и хромоникелевых аустенитных сталей типа 18-8 является сходным. В низко отпущенном состоянии при долговечности не более 10<sup>3</sup> 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.

# Конструкционные материалы оборудования АЭС. Особенности применения



АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ  
РОСАТОМ

**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.

## **Основные 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) в соответствии с установленным порядком, изложенном в НП-089

# Конструкционные материалы ТПА АЭС и требования к ней



АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ  
РОСАТОМ

## 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
- 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

# Импортные материалы. Особенности. Маркировка



Маркировка сталей и сплавов, принятая в НД различных стран мира, отличается и имеет различные подходы. Химический состав – далеко не единственный критерий: в ряде случаев маркировка может содержать информацию о физических характеристиках, областях применения и т.п.

Обозначения легирующих элементов в стандартах различных стран могут существенно различаться. Все это приводит к тому, что практически одинаковые стали в стандартах разных стран имеют абсолютно различные обозначения

Элемент	Символ	Страна			
		Россия	Германия	Франция	Италия
Алюминий	Al	Ю	Al	A	A
Бор	B	P	B	B	-
Углерод	C	-	-	-	-
Кобальт	Co	K	Co	K	K
Хром	Cr	X	Cr	C	C
Медь	Cu	Д	Cu	U	-
Марганец	Mn	Г	Mn	M	M
Молибден	Mo	М	Mo	D	D
Азот	N	A	N	Az	Az
Ниобий	Nb	Б	Nb	Nb	-
Никель	Ni	Н	Ni	N	N
Фосфор	P	П	P	P	-
Кремний	Si	С	Si	S	S
Титан	Ti	Т	Ti	T	T
Ванадий	V	Ф	V	V	-
Вольфрам	W	В	W	W	-
Цирконий	Zr	Ц	Zr	Zr	-

Марка стали	Страна				
	Россия	Германия	Франция	Италия	Чехия, Словакия
	Ст.0	St33-1	<del>ADx</del>	A000	10000
	Ст.3кп	Ust37-1	A370-1bis	A370	10370
	Ст.4кп	Ust42-2	A420-3	Ag420	11423
	10	Ck10	C10	C10	12010
	45	Ck45	C45	C45	12050
	50ХФА	50CrV4	50CV4	50CV4	15260
	38ХМЮ	-	-	38CAD7	15340
	12ХН3А	-	4NC11	16NiCr11	16420
	12Х13	X10Cr13	-	-	X15C13

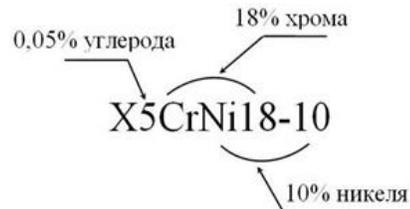
Наиболее популярными из систем являются: **EN, AISI, ASTM** и универсальная **UNS**



# Импортные материалы. Маркировка

## Система маркировки стали по EN

Эта система похожа на маркировку отечественных сталей. Описание стандартно начинается с указания на содержание углерода, массовая доля которого указывается после буквы сразу. Основное отличие заключается в том, что в описание сначала перечисляются все химические элементы, содержащиеся в стали, а потом их процентное содержание.



## Система обозначений ASTM

В системе ASTM обозначение сталей включает:

- буква А \*, означает, что стандарт распространяется на черные металлы (В – цветные материалы);
- порядковый номер нормативного документа ASTM (стандарта);
- собственно обозначения марки стали

Например, в стали **ASTM A516/A516M-90 Grade 70** буква А указывает на то, что материал относится к черным металлам; 516 – это порядковый номер стандарта ASTM (516М – тот же стандарт, но в метрической системе обозначений); 90 – год издания стандарта; Grade 70 – марка стали (здесь 70 показывает минимальный предел прочности при испытаниях на растяжение, в ksi, что составляет около 485 Н/мм<sup>2</sup>).

При обозначении сталей для труб и поковок применяют дополнительные буквы перед цифровым кодом марки стали:

- Р: трубы для трубопроводов (pipes);
- Т: конструкционные трубы (tubes);
- ТР: трубы всех типов;
- F: поковки.

### Примеры:

Марка стали Р22 по ASTM А 335/А 335М-03: Трубы бесшовные из нержавеющей ферритной стали.

Марка стали ТР304 по ASTM А 312/А 312М-03: Трубы бесшовные и сварные из аустенитной стали.

Марка стали F22 по ASTM А 336М-03а: Поковки из легированной стали для изделий для работы под давлением и при повышенных температурах.

# Импортные материалы. Маркировка



## Система обозначений AISI

Углеродистые и легированные стали обозначаются четырьмя цифрами; коррозионностойкие – тремя.

Первые две показывают номер группы в зависимости от основного легирующего элемента, а две последние – среднее содержание углерода в сотых долях процента.

Группы назначены следующим образом:

- 1xxx: цифра 1 принята для обозначения углеродистых сталей, в этом случае вторая цифра - 0. Например, сталь по ASTM-SAE марки 1015 соответствует стали марки 15 по российскому стандарту, а 1045 - марке 45; Первая цифра 2 соответствует сталям легированным Ni;
- 3xxx - Ni и Cr;
- 4xxx - Mo и Cr, Mo и Ni;
- 5xxx - Cr;
- 6xxx -Cr и V;
- 7xxx - Cr, Al и V;
- 8xxx - Ni, Cr и Mo;
- 9xxx - также Ni, Cr и Mo.

Кроме четырех цифр, в наименованиях сталей могут встречаться и буквы. Буквы В и L означают, что сталь легирована соответственно бором (0,0005...0,03 %) или свинцом (0,15...0,35 %).

Буквы ставятся между второй и третьей цифрой обозначения, например, 51 В 60 или 15 L 48.

Буквы М и Е ставятся впереди наименования стали и означают, что сталь предназначена для производства неотвественного сортового проката (буква М) или выплавлена в электропечи (буква Е).

В конце наименования может присутствовать буква Н, означающая, что сталь имеет высокую прокаливаемость.

Первое двузначное число	Тип стали	Содержание элементов
10xx	углеродистая	-
11xx	автоматная	< 0,4%P
12xx	автоматная	Повышенное содержание серы и фосфора
13xx	марганцовистая	-
23xx	никелевая	3,5%Ni
25xx	никелевая	5%Ni
31xx	никель-хромистая	1,25%Ni; 0,6%Cr
32xx	никель-хромистая	1,75%Ni; 1,0%Cr
33xx	никель-хромистая	3,5%Ni; 1,5%Cr
40xx	молибденовая	1,0%Cr; 0,2%Mo
43xx	никель-хром-молибденовая	-
44xx	молибденовая	0,35-0,45%Mo
45xx	молибденовая	0,45-0,65%Mo
46xx	никель-молибденовая	1,8%Ni; 0,25%Mo
47xx	никель-хром-молибденовая	1,0%Ni; 0,45%Cr; 0,35Mo
48xx	никель-молибденовая	3,5%Ni; 0,25%Mo
50xx	хромистая	0,35%Cr
51xx	хромистая	0,8%Cr
61xx	хромованадиевая	1%Cr
71xx	хромо-алюминий-ванадиевая	-
81xx	никель-хром-молибденовая	0,3%Ni; 0,4%Cr; 0,12%Mo
86xx	никель-хром-молибденовая	0,55%Ni; 0,50%Cr; 0,20%Mo
87xx	никель-хром-молибденовая	0,55%Ni; 0,50%Cr; 0,25%Mo

# Импортные материалы. Маркировка



Коррозионностойкие стали обозначаются тремя цифрами и следующими за ними одной, двумя или более буквами.

Первая цифра показывает класс стали и, соответственно, систему легирования. Так, например, аустенитные **коррозионностойкие стали** начинаются с цифр 2xx и 3xx, а ферритные или мартенситные – 4xx. При этом последние две цифры, в отличие от углеродистых и легированных сталей, никак не связаны с химическим составом, а просто определяют порядковый номер стали в группе.

Шарикоподшипниковые стали маркируют пятизначным числом, в котором три последние цифры соответствуют содержанию хрома в сотых долях процента

Система легирования имеет следующее цифровое обозначение:

- 2xx – Cr-Mn-Ni с азотом;
- 3xx – Cr-Ni;
- 4xx – Cr;
- 5xx – Cr-Mo;
- 6xx – Cr-Ni-Mo

Дополнительные буквы и цифры в обозначениях коррозионностойких сталей по системе обозначений AISI

Символ AISI	Описание
xxxL	Низкое содержание углерода (менее 0,03 %)
xxxS	Нормальное содержание углерода (менее 0,08 %)
xxx N	Добавлен азот
xxxLN	Низкое содержание углерода (менее 0,03 %) и добавлен азот
xxxF	Повышенное содержание серы и фосфора
xxxSe	Добавлен селен
xxxV	Добавлен кремний
xxxH	Расширенный интервал содержания углерода
xxxCu	Добавлена медь

# Импортные материалы. Маркировка



## Универсальная система обозначений UNS

Универсальная система UNS была создана в 1975 г. для унификации различных систем обозначений, используемых в США. Согласно UNS обозначения сталей состоят из буквы, определяющей группу сталей и пяти цифр

Символ	Группа сталей
Dxxxxx	Стали с предписанными механическими свойствами
Gxxxxx	Углеродистые и легированные стали AISI (кроме инструментальных)
Hxxxxx	То же, но для прокаливаемых сталей
Jxxxxx	Литейные стали
Kxxxxx	Стали, не включенные в систему AISI
Sxxxxx	Жаростойкие и коррозионностойкие стали
Txxxxx	Инструментальные стали
Wxxxxx	Сварочные материалы

В системе UNS проще всего классифицировать стали AISI.

Для конструкционных и легированных сталей, входящих в группу G, первые четыре цифры – это обозначение стали в системе AISI, а последняя цифра заменяет буквы, которые встречаются в обозначениях по AISI. Так, например, буквам В и L, означающим, что сталь легирована бором или свинцом, соответствуют цифры 1 и 4. Букве E, показывающей, что сталь выплавлена в электропечи – цифра 6.

Наименования коррозионностойких AISI начинаются с буквы S и включают обозначение стали по AISI (первые три цифры) и две дополнительные цифры, соответствующие дополнительным буквам в обозначении по AISI.

*Примеры обозначения сталей в системе UNS:*

Углеродистая сталь 1045 имеет обозначение в системе UNS G10450, а легированная сталь 4032 – G 40320.

Сталь 51B60 (легированная бором) называется в системе UNS G 51601, а сталь 15 L 48 (легированная свинцом) – G 15484. Коррозионностойкие стали обозначаются: 304L – S30401, 304H – S30409, а 304 Cu – S30430 и т. д.

# Порядок применения импортных материалов



АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ  
РОСАТОМ

**Нормативная база:** НП-089; ГОСТ Р 50.07.01

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

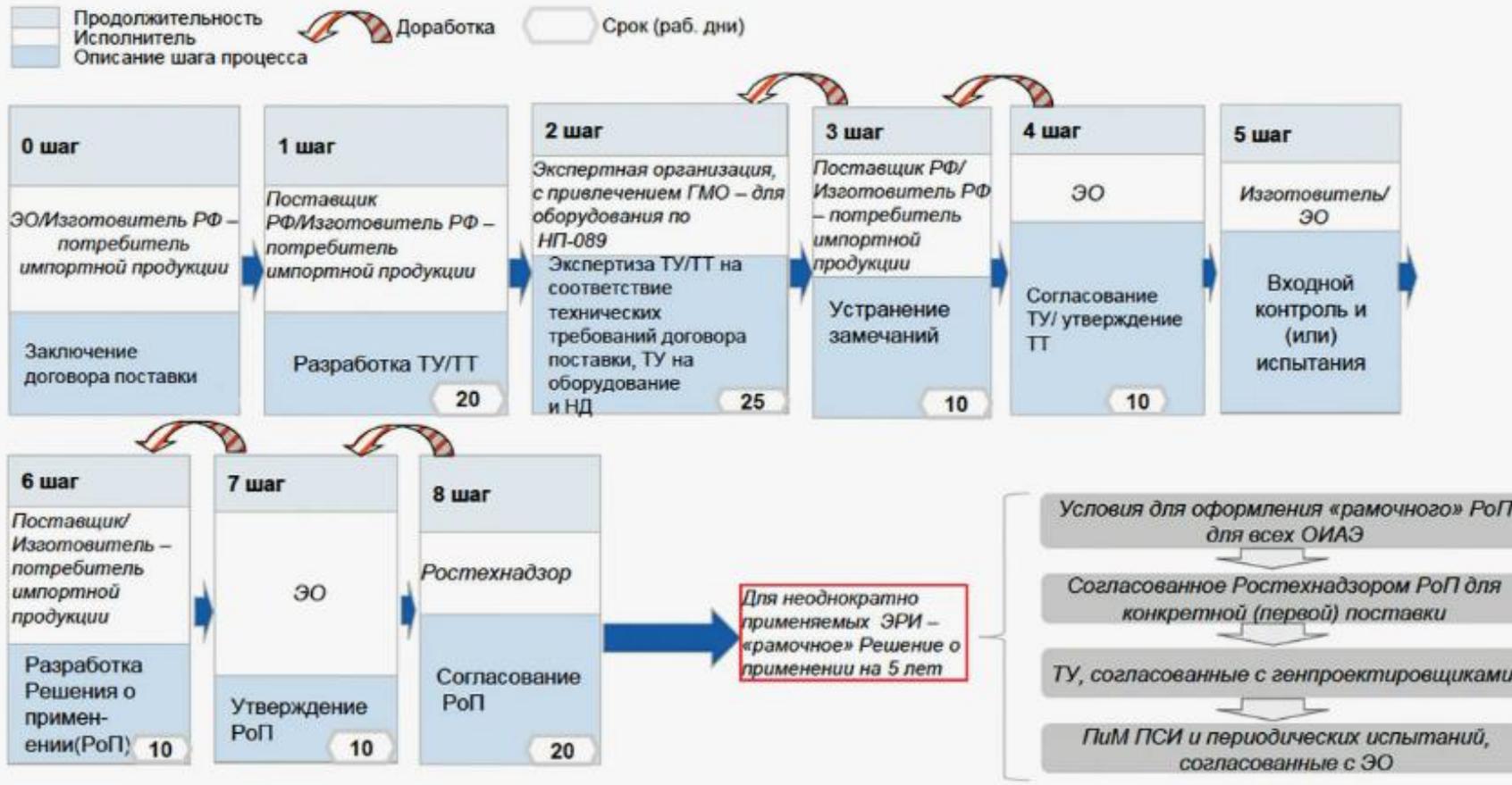
- перечень применимых на конкретном Проекте норм, правил и других действующих нормативных документов, требованиям которых должны соответствовать предполагаемые к применению материалы
- физико-механические, технологические и коррозионные свойства основного материала и (или) металла шва или наплавленного 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

# Порядок применения импортных материалов



Схема процесса принятия решения о применении в составе оборудования 1, 2, 3 классов безопасности импортных электронных компонентов (в т.ч. в качестве запасных частей, инструментов и принадлежностей), основных полуфабрикатов и сварочных (наплавочных) материалов при первичном применении



# Принципы подбора аналогов сталей



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

# Спасибо за внимание

**Семенова Елена**

[Semanova\\_es@aer.ru](mailto:Semanova_es@aer.ru)

**22.10.2024**