

# 2 МАТЕРИАЛЫ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ. СТАЛИ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

## 2.1 Группы стали

- ▶ **Сталь** - это сплав железа с углеродом (углерода до 2 %) и незначительным количеством примесей (которые не вводятся преднамеренно, а попадают из руды или образуются в процессе выплавки) и легирующих компонентов (которые вводятся для улучшения свойств стали).

В зависимости от содержания легирующих компонентов стали, делятся на четыре группы:

- ▶ 1) **углеродистые** - легирующие элементы специально не вводятся;
- ▶ 2) **низколегированные** - суммарное содержание легирующих элементов до 2,5 %;
- ▶ 3) **среднелегированные** - легирующих компонентов 2,5-10 %;
- ▶ 4) **высоколегированные** - легирующих компонентов более 10 %.

Углеродистая сталь в зависимости от содержания углерода подразделяется на:

- ▶ а) малоуглеродистую с содержанием углерода 0,09-0,25 % (в основном применяется в строительстве);
- ▶ б) среднеуглеродистую с содержанием углерода 0,25-0,6 % (конструкционная, применяется в машиностроении);
- ▶ в) высокоуглеродистую с содержанием углерода 0,6-2% (инструментальная).

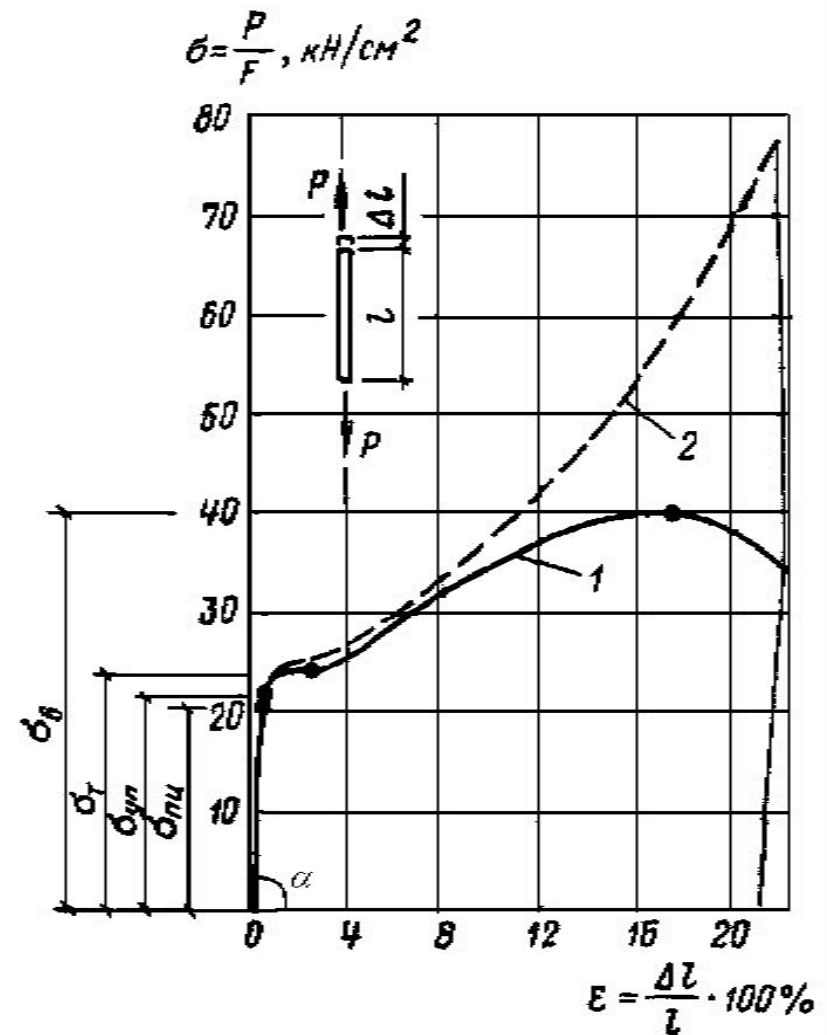


Диаграмма работы малоуглеродистой стали при растяжении.

$$\sigma = \frac{F}{A}, \text{кН/см}^2; \quad \epsilon = \frac{\Delta e}{e} \cdot 100\%$$

- ▶ В строительстве в основном применяются малоуглеродистая сталь, (обладающая большой пластичностью, ковкостью, хорошей свариваемостью, плохой закаливаемостью) и низколегированные стали повышенной и высокой прочности, обладающие меньшей склонностью к хрупким разрушениям. По своей структуре низкоуглеродистая (малоуглеродистая) сталь является однородным кристаллическим телом, состоящим из зерен (кристаллов) феррита, занимающих почти весь объем стали, а также перлитовых и цементитовых включений между зернами феррита и по его граням. Вкрапления и прослойки перлита, обволакивая зерна феррита, создают как бы жесткую и упругую “сетку” (решетку, каркас) вокруг мягкого и пластичного феррита. Такое строение стали, объясняет её работу под нагрузкой и её пластические свойства (упругая стадия - работа решетки перлита; площадка текучести - разрушение решетки перлита с включением в работу феррита).
- ▶ Структура низколегированных и среднелегированных сталей похожа на структуру малоуглеродистой стали. Прочностные свойства низколегированных сталей повышается благодаря введению различных легирующих элементов, которые упрочняют сетку (решетку) между зернами феррита.

## 2.2 Механические свойства стали

- ▶ Характеризуют следующие основные показатели.
- ▶ 1) **Предел текучести  $\sigma_T$**  характеризующий напряжение, до достижения которого можно считать металл работающим упруго и пользоваться методами расчета по упругой стадии материала. Предел текучести является началом границы пластической стадии работы металла, его текучести, т. е. началом возрастания деформаций при неизменной нагрузке.
- ▶ 2) **Временное сопротивление (предел прочности)  $\sigma_B$**  характеризующее условное напряжение разрыва растянутого образца (отношение разрушающей нагрузки к первоначальной площади сечения). Временное сопротивление характеризует прочность стали.
- ▶ 3) **Относительное удлинение  $\varepsilon$**  - отношение приращения длины образца после разрыва к ее исходному значению. Различают два относительных удлинения: для длинного круглого образца ( $L_{расч} = 10d$ )- $\delta_{10}$  и для короткого ( $L_{расч} = 5d$ )- $\delta_5$ . Относительное удлинение характеризует, пластические свойства стали.

# 2 МАТЕРИАЛЫ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ. СТАЛИ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

## 2.1 Группы стали

- ▶ 4) Ударная вязкость  $\alpha_n$  - работа, затраченная на разрушение специального образца ударным изгибом. Ударная вязкость характеризует склонность стали к переходу в хрупкое состояние. Испытания на ударную вязкость могут проводиться при нормальной температуре  $t = 20^\circ\text{C}$ , а также при отрицательных температурах  $t = -20^\circ\text{C}$ ,  $t = -40^\circ\text{C}$ ,  $t = -70^\circ\text{C}$  и после механического старения. При отрицательных температурах и после механического старения склонность стали к переходу в хрупкое состояние увеличивается и значение ударной вязкости уменьшается. Порог хладноломкости -  $t^\circ\text{C}$  при которой происходит спад ударной вязкости или снижение её ниже 0,03
- ▶ 5) Изгиб в холодном состоянии на  $180^\circ\text{C}$ . Это испытание характеризует пластические свойства стали и склонность ее к трещинообразованию.

## 2.3 Влияние химического состава на механические свойства стали

- ▶ Химический состав стали характеризуется процентным содержанием в ней различных компонентов и примесей.
- ▶ **Углерод (У)** - повышает предел текучести и временное сопротивление стали, однако пластичность и свариваемость стали уменьшаются. Поэтому в строительных конструкциях применяют только низкоуглеродистые стали с содержанием углерода до 0,22 %.
- ▶ **Кремний (С)** - раскисляет сталь, увеличивает предел текучести и временное сопротивление, ухудшает свариваемость, стойкость против коррозии и сильно снижает ударную вязкость.
- ▶ **Марганец (Г)** - увеличивает предел текучести и временное сопротивление стали.
- ▶ **Медь (Д)** - повышает прочность стали и увеличивает стойкость ее против коррозии. Избыточное (более 0,7 %) содержание меди способствует старению стали.
- ▶ **Алюминий (Ю)** - хорошо раскисляет сталь, повышает ее ударную вязкость.

- ▶ **Азот (А)** - увеличивает хрупкость стали, особенно при низких температурах, и способствует ее старению.
- ▶ **Никель (Н), хром (Х), ванадий (Ф), вольфрам (В), молибден (М), титан (Т), бор (Р)** являются легирующими компонентами, улучшающими механические свойства стали; применение их для сталей, используемых в строительстве, ограничивается дефицитностью и высокой стоимостью.
- ▶ Ряд примесей является вредным для сталей, сильно ухудшая ее конструкционные качества;
- ▶ **Фосфор (П)** - резко уменьшает пластичность и ударную вязкость стали, а также делает ее **хладноломкой** (хрупкой при отрицательных температурах),
- ▶ **Сера** - несколько уменьшает прочностные характеристики стали и, главное, делает ее **красноломкой** (хрупкой и склонной к образованию трещин при температуре 800 - 1000°С), что влечет за собой появление сварочных трещин.
- ▶ **Кислород, водород и азот**, которые могут попасть в расплавленный металл из воздуха и остаться там, ухудшают структуру стали и способствуют увеличению ее хрупкости.

## 2.3 Влияние химического состава на механические свойства стали

- ▶ Достигается термической обработкой.
- ▶ **Нормализация** (разновидность отжига) нагрев проката свыше  $910^{\circ}\text{C}$  -  $930^{\circ}\text{C}$  с последующим охлаждением на воздухе. Это приводит к уплотнению структуры стали и снятию внутренних напряжений. Нормализация, являясь простейшим видом термической обработки, стали, применяется довольно часто.
- ▶ **Закалка** заключается в нагреве стали выше  $910^{\circ}\text{C}$  -  $930^{\circ}\text{C}$  с последующим быстрым охлаждением. В зависимости от скорости охлаждения могут быть получены различные структуры - более или менее твердые и мелкозернистые.
- ▶ **Отпуск** заключается в нагреве проката до  $t=723^{\circ}\text{C}$  с последующим медленным охлаждением для получения более однородного и устойчивого структурного строения сплава. Различают высокий, средний и низкий отпуск.



- ▶ При **высоком отпуске** (600 - 650 °С) временное сопротивление стали снижается, а пластичность повышается.
- ▶ **Низкий отпуск** (350 - 400 °С) ухудшает показатели ударной вязкости. При благоприятных условиях углерод выделяется и располагается между зернами феррита, а также группируется у различных дефектов кристаллической решетки. Это приводит к повышению предела текучести и временного сопротивления и к уменьшению пластичности и сопротивления хрупкому разрушению. Эта перестройка структуры и изменение прочности и пластичности происходит в течение достаточно длительного времени, поэтому такое явление называется **старением**. Старению способствуют: а) механические воздействия и особенно развитие пластических деформаций (**механическое старение**); б) температурные колебания. Невысоким нагревом (до 150-200 °С) можно резко усилить процесс старения. При пластическом деформировании и последующем небольшом нагреве интенсивность старения резко повышается (**искусственное старение**). Поскольку старение понижает сопротивление динамическим воздействиям и хрупкому разрушению, оно рассматривается как явление отрицательное. Наиболее подвержены старению кипящие стали.

## 2.5 Виды производства стали, применяемой в металлических конструкциях

- ▶ Сталь, применяемая в металлических конструкциях, производится двумя способами: в мартеновских печах и конверторах с продувкой кислородом сверху. Стали мартеновского и кислородно-конверторного производства по своему качеству и механическим свойствам практически одинаковы. Однако производство кислородно-конверторной стали проще и дешевле, поэтому она начинает вытеснять мартеновскую.
- ▶ **Нераскисленные стали** «кипят» при разливке в изложницы вследствие выделения газов: такая сталь носит название **кипящей** и оказывается более засоренной газами и менее однородной.
- ▶ Механические свойства несколько изменяются по длине слитка ввиду неравномерного распределения химических элементов. Особенно это относится к головной части, которая получается наиболее рыхлой (вследствие усадки и наибольшего насыщения газами). Поэтому от слитка отрезают дефектную головную часть, составляющую примерно 5 % массы слитка. Кипящие стали, имея достаточно хорошие показатели по пределу текучести и временному сопротивлению, хуже сопротивляются хрупкому разрушению и старению.
- ▶ Чтобы повысить качество малоуглеродистой стали, ее раскисляют добавками кремния или алюминия.

- ▶ **Раскисленные** стали не кипят при разливке в изложницы, поэтому их называют **спокойными**. От головной части слитка спокойной стали отрезают часть, составляющую примерно 15 %. Спокойная сталь более однородна, лучше сваривается, лучше сопротивляется динамическим воздействиям и хрупкому разрушению.
- ▶ Однако спокойные стали примерно на 12 % дороже кипящих, и выход годного проката ниже примерно на 10%, что заставляет ограничивать её применение.
- ▶ **Полуспокойная** сталь по качеству является промежуточной между кипящей и спокойной. Она раскисляется меньшим количеством кремния, редко алюминием. От головной части слитка отрезается меньшая часть, равная примерно 8 % массы слитка. При прокате происходит обжатие металла, размельчение зерен и различное их ориентирование вдоль и поперек проката, что сказывается на механических свойствах металла. На свойства металла влияют также температура прокатки и последующее остывание. При окончании прокатки при заниженной температуре металл **наклепывается**. Это приводит к повышению временного сопротивления и предела текучести, но снижает пластические свойства и ударную вязкость. Значения предела текучести и временного сопротивления стали зависит от её толщины. С увеличением толщины проката сталь становится менее пластичной и предел текучести и временное сопротивление её уменьшается.

- ▶ При столь многообразных факторах, влияющих на прочность стали, вполне естественно, что показатели прочности имеют определенное рассеивание.
- ▶ На основании полученных статистических данных устанавливаются наименьшие значения механических свойств металла, которые записываются в соответствующие ГОСТы и по которым производится отбраковка металла на металлургических заводах. Стали с одинаковым химическим составом и механическими свойствами составляют одну марку стали.
- ▶ В зависимости от механических свойств (предела текучести) все стали, применяемые для строительных конструкций, в соответствии с СНиП 2-23-81\* объединены в классы прочности (классы стали). Таких классов шестнадцать: С 235, С 245, С 255, С 275, С 285, С 345, С 345Т, С 345К, С 375, С 375, С 375Т, С 390, С 390К, С 440, С 590, С 590К (принятые обозначения: С — сталь, цифра - предел текучести стали, Т - термоупрочненная, К - повышенной коррозионной стойкости).

- ▶ В зависимости от назначения и гарантируемых характеристик углеродистая сталь подразделяется на три группы:
- ▶ группа А – гарантируются механические свойства;
- ▶ группа Б – гарантируется химический состав;
- ▶ группа В – гарантируются механические свойства и отдельные требования по химическому составу.
- ▶ В строительных конструкциях применяется преимущественно сталь группы В, так как для обеспечения прочности необходима гарантия механических свойств, а для свариваемости и высокого качества стали требуется соблюдение норм по химическому составу. Для второстепенных нерасчетных элементов конструкций иногда применяется сталь группы Б. Сталь группы А в строительных конструкциях, как правило, не применяется.
- ▶ В зависимости от нормируемых показателей стали всех групп подразделяют на 6 **категорий** (химический состав,  $R_{un}$ ,  $R_{yn}$ , изгиб в холодном состоянии, ударная вязкость при  $t=+20\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $t=-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , после механического старения). **Обозначения марок углеродистой стали** обыкновенного качества по ГОСТ 380-71 приняты буквенно-цифровыми. Буквы Ст означают слово «сталь», цифры 0, 1, 2, 3, 4 и .т, д. - условный порядковый номер марки в зависимости от химического состава стали и ее свойств. Для стали групп Б и В перед обозначением марки стали ставится буква Б или В. Степень раскисления стали обозначается индексами «сп» (спокойная), «пс» (полуспокойная) и «кп» (кипящая), добавляемыми к обозначению марки стали.

- ▶ Для обозначения полуспокойной стали с повышенным содержанием марганца после номера марки ставят букву Г. Для обозначения категории стали в конце ставится ее номер (для первой категории номер не ставится). Например, обозначение ВСтЗсп5 соответствует марке стали 3, спокойной, группы В, 5-й категории; обозначение ВСтЗГпс5 - марке стали 3 с повышенным содержанием марганца, полуспокойной, 5-й категории; обозначение Ст1кп – марке стали 1, кипящей, группы А, 1-й категории.
- ▶ Наиболее распространенной в строительных металлических конструкциях является сталь марки Ст3. Сталь 3 обладает достаточно высоким пределом текучести  $R_{yп}=23–24 \text{ кН/см}^2$ , пластична, хорошо сваривается, надежно работает при различных силовых воздействиях.
- ▶ В целях унификации применения и упрощения заказа требуемой стали Нормами проектирования стальных конструкций (СНиП II-23-81) предусмотрено применение в строительных конструкциях низкоуглеродистых сталей только следующих способов выплавки и категорий:
  - ▶ 1) *полуспокойной – 6-й категории (ВСтЗпс6) - 2-я группа прочности*
  - ▶ 2) *спокойной и полуспокойной с повышенным содержанием марганца – 5-й категории, (ВСтЗсп5-1, ВСтЗГпс5);*
  - ▶ 3) *кипящей – 2-й категории (ВСтЗкп2-1)- 1,2 группа прочности*
- ▶ В настоящее время поставляется сталь СтТпс и ВСтТсп с пределом текучести  $29 \text{ кН/см}^2$ , получаемая на основе углеродистой стали путем термической обработки.

- ▶ Обозначения марок низколегированных сталей построено по следующему принципу: первые цифры обозначают среднее количество углерода в сотых долях процента, буквы показывают наличие легирующих компонентов, цифры за буквами указывают количество легирующего компонента в целых процентах (цифра 1 обычно не проставляется); если легирующего компонента меньше 0,3%, то он в обозначение марки не вводится. Например, марка **10ХСНД** обозначает сталь со средним содержанием углерода 0,1%, легированную хромом, кремнием, никелем и медью в количествах более 0,3% и менее 1%; сталь **14Г2** содержит в среднем 0,14 % углерода и до 2% марганца.
- ▶ При применении литья в строительных конструкциях употребляется сталь для отливок или серый чугун для отливок.

## 2.6 Сортамент для стальных конструкций

- ▶ Сортаментом называют каталоги (ГОСТ) поставляемых металлургическими заводами листов и профилей с указанием их формы, размеров, геометрических характеристик, массы. Сортамент разработан на основе результатов многолетнего развития металлических конструкций и работ по теории сортамента.
- ▶ В стальных конструкциях применяется листовая и профильная прокатная сталь. Профильная сталь разделяется на сортовую (круг, квадрат, полоса, уголки) и фасонную (двутавры, швеллеры, шпунтовые и другие фасонные профили). Кроме этого, широко применяется сортамент вторичных профилей:
  - сварных, профиль которых образован соединением на сварке отдельных полос или листов;
  - гнутых, образованных холодной гибкой стальных полос и листов.



## 2.7 Алюминиевые сплавы, и их состав, свойства и особенности работы

- ▶ Для строительных конструкций применяются алюминиевые сплавы с содержанием легирующих компонентов и примесей 5-7 % (технический алюминий с примесями до 1 % ввиду малой прочности применяется очень редко и только для декоративных и ограждающих элементов). Алюминиевые сплавы разделяются на **деформируемые** (обрабатываемые давлением: прессованием, вытяжкой, прокаткой, штамповкой и т.д.), применяемые в строительных конструкциях, и на **литейные**, применяемые в основном в машиностроении.
- ▶ Алюминиевые сплавы **легируют** марганцем, магнием, кремнием, цинком, медью, хромом, титаном или одновременно несколькими этими компонентами, в зависимости от чего система сплава получает наименование и марку с условным обозначением.
- ▶ Алюминиевые сплавы поставляют в различных состояниях **термической** обработки и нагартовки (наклеп, вытяжка).

▶ **Технический алюминий** обладает очень высокой коррозионной стойкостью, но малопрочен и пластичен. **Алюминиево-марганцевые** и **алюминиево-магниевые** сплавы обладают высокой коррозионной стойкостью, сравнительно высокой прочностью и хорошо свариваются. **Многокомпонентные сплавы** обладают средней и высокой коррозионной стойкостью, средними и высокими показателями прочности и могут применяться в сварных и клепаных несущих и ограждающих конструкциях.

▶ Термическая обработка повышает прочностные характеристики сплавов в 1,3-1,5 раза. При сварке конструкций из термически обработанных сплавов происходит некоторое разупрочнение материала в зоне термического влияния, которое надо учитывать при расчете и конструировании сварных соединений. Термически не упрочняются сплавы марок АМг и АМц. Чтобы повысить коррозионную стойкость, алюминиевые сплавы могут быть **плакированными** (покрытыми тонкой пленкой чистого алюминия при изготовлении полуфабриката)

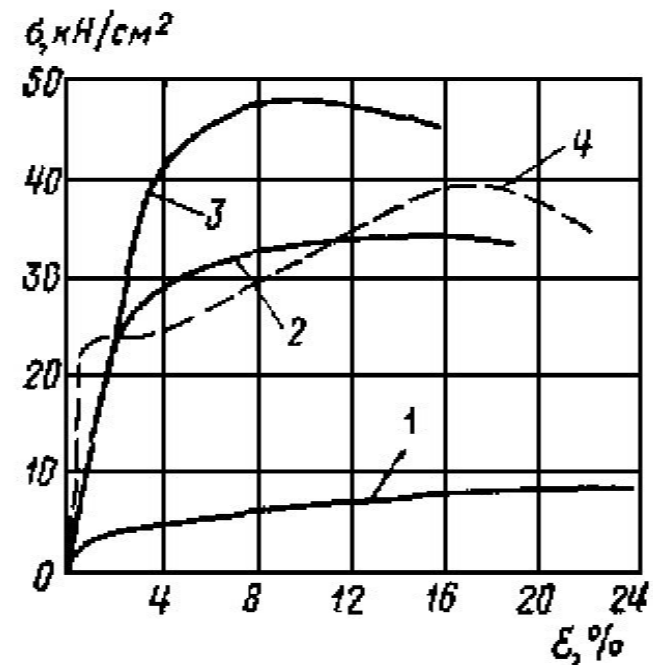


Рисунок 1  
1-технический алюминий АД1М;  
2- сплав 1915Т; 3- сталь 3

- ▶ Структура алюминиевых сплавов состоит из кристаллов алюминия, упрочненных легирующими элементами (легирующие элементы входят в твердый раствор с алюминием и упрочняют его). Особенно большое упрочнение сплава получается, если количество легирующего компонента больше максимально растворимого при обычной температуре, тогда компоненты выделяются в виде упрочняющих включений. Ввиду относительно малой прочности включений и прослоек между зернами под действием нагрузки происходят более плавные деформации, и, в отличие от малоуглеродистой стали, площадки текучести в сплавах не получается.
- ▶ На рис. 1 приведены диаграммы работы некоторых алюминиевых сплавов на растяжение (там же для сравнения дана кривая для стали 3). Наиболее существенные отличия в работе алюминиевых сплавов и стали заключаются в меньшем угле наклона первоначальной прямолинейной части диаграммы алюминиевых сплавов, характеризующем модули упругости материалов ( $2,1 \cdot 10^4$  кН/см<sup>2</sup> для сталей и  $0,71 \cdot 10^4$  кН/см<sup>2</sup> для алюминиевых сплавов), в отсутствии площадки текучести у алюминиевых сплавов, а также в меньшем относительном удлинении термически обработанных сплавов.

- ▶ **Механические свойства** алюминиевых сплавов зависят не только от химического состава, но и от условий их обработки. Основное отличие работы алюминиевых сплавов от работы стали заключается в том, что они более деформативны, т. е. имеют меньшую жесткость. У алюминиевых сплавов модуль упругости при растяжении  $E=0,7 \cdot 10^4$  кН/см<sup>2</sup>, а модуль упругости при сдвиге  $G=0,27 \cdot 10^4$  кН/см<sup>2</sup> что почти в 3 раза меньше, чем у стали; поэтому при равных напряжениях прогибы алюминиевых конструкций в 3 раза больше. Коэффициент Пуассона  $\mu=0,3$ . На диаграмме растяжения алюминиевых сплавов нет площадки текучести. За предел текучести условно принимается напряжение  $\sigma$  при котором относительная остаточная деформация достигает  $\varepsilon=0,2$  %. При температурах выше 100 °С наблюдается некоторое снижение прочностных характеристик, а начиная примерно с 200 °С появляется ползучесть. Коэффициент температурного расширения алюминия  $=0.000023$ , что в 2 раза больше чем у стали. При пониженных температурах все механические показатели алюминиевых сплавов улучшаются. Ударная вязкость сплавов при нормальной температуре ниже чем у стали (около 3,0 кг·м/см<sup>2</sup>), и почти не снижается при отрицательных температурах.
- ▶ Изменение механических свойств алюминиевых сплавов при старении происходит более интенсивно, чем у стали, и увеличение пределов текучести и прочности значительно выше. Увеличение прочности алюминиевых сплавов при старении учитывают при назначении их расчетных сопротивлений. Расчетные формулы для алюминиевых конструкций при различных силовых воздействиях имеют такой же вид, как и для стальных конструкций. Значения различных коэффициентов принимают в зависимости от марок сплавов по нормам проектирования алюминиевых конструкций СНиП II-24-74.

- ▶ **К достоинствам алюминиевых сплавов** можно отнести: относительно высокую прочность при малой плотности самого материала; высокую технологичность при обработке прессованием, прокаткой или ковкой, позволяющую изготавливать изделия сложной формы; высокую стойкость против коррозии, высокие механические характеристики при отрицательных температурах; отсутствие искрообразования при ударных воздействиях.
- ▶ **Недостатки алюминиевых сплавов:** относительно небольшой модуль упругости; высокий коэффициент температурного расширения; относительная сложность выполнения соединений; дефицитность и пока ещё высокая стоимость; малая огнестойкость.
- ▶ Профили из алюминиевых сплавов для алюминиевых конструкций получают **прокаткой, прессованием или гнутьем**. Прокатывают только плоские профили: листы, полосы, ленты. Прессованные профили могут быть самого различного очертания, поперечное сечение их должно вписываться в круг диаметром матрицы размером 320 мм (имеются отдельные прессы с диаметром матрицы 530 мм). Эти профили изготавливают на специальных прессах. Цилиндрическая, нагретая примерно до 400°С заготовка из алюминиевого сплава продавливается через стальную матрицу с отверстием по форме сечения профиля. Матрица удерживается держателем. Прессоваться могут как сплошные так и пустотелые (трубчатые) профили.

Гнутые профили изготавливают путём гибки тонких листов или лент на роликогибочных станах или гибочных прессах.