

**ИФО | 01.03.04 | ПМ | 6-й семестр**

# **Строительные конструкции**

## **Лекция №14**



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ

**СТРОИТЕЛЬНЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ**

www: [mgsu.ru/universityabout/Struktura/Kafedri/ZhBK/](http://mgsu.ru/universityabout/Struktura/Kafedri/ZhBK/)

e-mail: [gbk@mgsu.ru](mailto:gbk@mgsu.ru); [dpekin@mail.ru](mailto:dpekin@mail.ru)

тел.: +7 495 287 49 14 доб. 3036, 3084

Пекин Дмитрий Анатольевич, доцент, к.т.н.

# Лекция №14 – Стальные конструкции

- Общие сведения
- Достоинства и недостатки стальных конструкций
- Основные требования при проектировании
- Основной принцип проектирования
- Надежность и долговечность стальных конструкций
- Основные свойства стали
- Оценка свариваемости стали
- Группы стальных конструкций
- Факторы, влияющие на свойства стали
- Работа стали в различных условиях
- Сортамент

# Стальные конструкции

В зависимости от **формы** и **назначения** можно разделить на восемь видов:

**1) Промышленные здания.** Конструкции одноэтажных промышленных зданий выполняются в виде цельнометаллических или **смешанных** каркасов, в которых по железобетонным колоннам устанавливаются металлические конструкции покрытия здания и подкрановые пути

Цельнометаллические каркасы в основном применяются в зданиях с большими пролетами и высотой, оборудованных мостовыми кранами большой грузоподъемности, а также в зданиях комплектной поставки – «легких металлических конструкциях». Каркасы промышленных зданий являются наиболее сложными и металлоемкими конструктивными комплексами

# Виды стальных конструкций

**2) Большепролетные покрытия зданий.** Здания общественного назначения – спортивные сооружения, рынки, выставочные павильоны, театры и некоторые здания производственного характера (ангары, авиасборочные цеха, лаборатории) – имеют большие пролеты (до 100-150 м), перекрывать которые наиболее целесообразно металлическими конструкциями

Системы и конструктивные формы большепролетных покрытий очень разнообразны. Здесь возможны балочные, рамные, арочные, висячие, комбинированные, причем как плоские, так и пространственные системы. К конструкциям зданий общественного назначения предъявляются высокие эстетические требования

# Виды стальных конструкций

- 3) Мосты, эстакады.** Мостовые металлические конструкции на железнодорожных и автомобильных магистралях применяются при больших, а в отдельных районах – и при средних пролетах, а также при сжатых сроках возведения. Как и большепролетные покрытия, мосты имеют разнообразные системы: балочную, арочную, висячую, комбинированную
- 4) Башни и мачты.** Применяются для радио и телевидения в геодезической службе, в опорах линий электропередачи. Сюда же можно отнести надшахтные копры, нефтяные вышки, дымовые и вентиляционные башни и трубы. Использование стали обеспечивает этим конструкциям необходимую легкость, удобство транспортирования на место строительства и быстроту монтажа

# Виды стальных конструкций

- 5) Листовые конструкции.** Применяются в виде резервуаров, газгольдеров, бункеров, трубопроводов большого диаметра и различных сооружений доменного комплекса, химического производства и нефтепереработки используются весьма широко в металлургии, нефтяной, газовой и химической промышленности
- Листовые конструкции являются тонкостенными оболочками различной формы. Они должны быть не только прочными, но и плотными (непроницаемыми). Листовые конструкции часто эксплуатируются в условиях низких или высоких температур, сталь и алюминиевые сплавы хорошо удовлетворяют этим условиям работы

# Виды стальных конструкций

- 6) **Каркасы многоэтажных зданий.** Многоэтажные здания с металлическим каркасом применяются главным образом в гражданском строительстве, в условиях плотной застройки больших городов и для некоторых видов промышленных зданий
- 7) **Крановые и другие подвижные конструкции.** Выполняются из материала, позволяющего максимально уменьшить их массу. Сюда относятся всевозможные металлические конструкции мостовых, башенных, козловых кранов и кранов-перегрузателей, конструкции крупных экскаваторов и разнообразных строительных машин, затворы и ворота гидротехнических сооружений, конструкции отвалных мостов

# Виды стальных конструкций

- 8) Прочие конструкции.** К ним, в первую очередь, можно отнести конструкции промышленности по использованию атомной энергии в мирных целях, разнообразные конструкции радиотелескопов для космической и радиосвязи, стационарные платформы для разведки и добычи газа и нефти в море, канатные дороги и многие другие



# Основные факторы совместного рассмотрения

Всех перечисленных выше видов стальных конструкций:

- **Во-первых**, исходным материалом для всех конструкций является прокатная сталь, выпускаемая по единому стандарту – сортаменту: лист, уголок, швеллер, двутавр, труба и т. п. Из этого материала komponуются разнообразные конструктивные формы сечений и элементов
- **Во-вторых**, все конструкции объединены одним технологическим процессом их изготовления, в основе которого лежат холодная обработка стали (резка, гибка, устройство отверстий и т. п.) и соединение деталей в конструктивные элементы и комплексы (сборочно-сварочные операции)

# Достоинства стальных конструкций:

- **Надежность.** Продиктована близким совпадением их действительной работы (распределение напряжений и деформаций) с расчетными предположениями. Сталь обладает большой однородностью структуры и достаточно близко соответствует расчетным предпосылкам об упругой и упругопластической работе материала
- **Легкость.** Из всех изготавливаемых в настоящее время других несущих конструкций (железобетонные, каменные, деревянные) стальные конструкции являются самыми легкими. Легкость конструкций  $C$ ,  $\text{м}^{-1}$ , определяется отношением плотности материала  $\rho$  к его сопротивлению  $R$ , например для сталей С245 и С590,  $\text{м}^{-1}$  :

$$C = \frac{\rho}{R} = \frac{\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}}{\frac{\text{кгс}}{\text{м}^2}} \rightarrow C_{245} = \frac{7850}{24\,500\,000} = 3,2 \cdot 10^{-4} \text{ и } C_{590} = \frac{7850}{59\,000\,000} = 1,3 \cdot 10^{-4}$$

# Достоинства стальных конструкций:

- **Индустриальность.** Стальные конструкции в основном изготавливаются на заводах, оснащенных современным оборудованием, что обеспечивает высокую степень индустриальности их изготовления. Монтаж стальных конструкций также производится индустриальными методами – специализированными организациями с использованием высокопроизводительной техники
  - **Непроницаемость.** Сталь обладает не только значительной прочностью, но и высокой плотностью – непроницаемостью для газов и жидкостей. Плотность стали и ее стыков, осуществляемых с помощью сварки, является необходимым условием для изготовления газгольдеров, резервуаров и т. п.
- Стальные конструкции имеют и недостатки, ограничивающие их применение, поэтому для их устранения необходимо принимать **специальные меры**

# Недостатки стальных конструкций:

- **Коррозия.** Незащищенная от действия влажной среды, а иногда (что еще хуже) атмосферы, загрязненной агрессивными газами, сталь корродирует (окисляется), что постепенно приводит к ее полному разрушению. При неблагоприятных условиях это может произойти через два-три года. Повышение коррозионной стойкости стальных конструкций достигается включением в сталь специальных легирующих элементов, периодическим покрытием конструкций защитными пленками (лаки, краски и т. п.), а также выбором рациональной конструктивной формы элементов (без щелей и пазух, где могут скапливаться влага и пыль), удобной для очистки и защиты

# Недостатки стальных конструкций:

- **Небольшая огнестойкость.** У стали при температуре 200 °С начинает уменьшаться модуль упругости, а при температуре 600 °С сталь полностью переходит в пластическое состояние. Поэтому стальные конструкции зданий, опасных в пожарном отношении (склады с горючими или легковоспламеняющимися материалами, жилые и общественные здания), должны быть защищены огнестойкими облицовками (бетон, керамика, специальные покрытия и т. п.)

# Основные требования при проектировании:

- **Условия эксплуатации.** Удовлетворение заданным в техническом задании условиям эксплуатации является основным требованием для проектировщика. Оно в основном определяет систему, конструктивную форму сооружения и выбор материала для него
- **Экономия металла.** Требование экономии металла определяется большой его потребностью во всех отраслях промышленности (машиностроение, транспорт и т. д.) и относительно высокой стоимостью
- **Транспортабельность.** В связи с изготовлением стальных конструкций, как правило, на заводах с последующей перевозкой на место строительства, в проекте должна быть предусмотрена возможность перевозки их целиком или по частям (отправочными элементами) с применением соответствующих транспортных средств

# Основные требования при проектировании:

- **Технологичность.** Конструкции должны проектироваться с учетом требований технологии изготовления и монтажа с ориентацией на наиболее современные и производительные технологические приемы, обеспечивающие максимальное снижение трудоемкости
- **Скоростной монтаж.** Конструкция должна соответствовать возможностям сборки ее в наименьшие сроки с учетом имеющегося монтажного оборудования
- **Долговечность.** Долговечность конструкции определяется сроками ее физического и морального износа. Физический износ металлических конструкций связан главным образом с процессами коррозии. Моральный износ связан с изменением условий эксплуатации

# Основные требования при проектировании:

- **Эстетичность.** Конструкции независимо от их назначения должны обладать гармоничными формами. Особенно существенно это требование для общественных зданий и сооружений

Все эти **требования** удовлетворяются конструкторами на основе выработанных наукой и практикой принципов отечественной школы проектирования и основных направлений ее развития

**Типизация** стальных конструкций получила весьма широкое развитие. Разработаны типовые решения часто повторяющихся конструктивных элементов: колонн, ферм, подкрановых балок, оконных и фонарных переплетов. В этих типовых решениях унифицированы размеры элементов и сопряжения. Для некоторых элементов разработаны стандарты



# Основной принцип проектирования:

Связан с достижением трех главных показателей:

- **Экономия** стали
- **Повышение** производительности труда при изготовлении
- **Снижение** трудоемкости и сроков монтажа, которые и определяют стоимость конструкции

Несмотря на то, что эти показатели часто при реализации вступают в противоречие один с другим (так, например, наиболее экономная по расходу стали конструкция часто бывает наиболее трудоемкой в изготовлении и монтаже), опыт развития стальных конструкций подтверждает возможность реализации этого принципа

# Надежность и долговечность стальных конструкций

Во многом зависят от свойств материала. Наиболее важными для работы конструкций являются механические свойства: прочность, упругость, пластичность, склонность к хрупкому разрушению, ползучесть, твердость, а также свариваемость, коррозионная стойкость, склонность к старению и технологичность

- **Прочность** характеризует сопротивляемость материала внешним силовым воздействиям без разрушения ( $\sigma_y$  – предел текучести,  $\sigma_u$  – временное сопротивление)
- **Упругость** – свойство материала восстанавливать свою первоначальную форму после снятия внешних нагрузок
- **Пластичность** – свойство материала сохранять деформированное состояние после снятия нагрузки, т. е. получать остаточные деформации без разрушения

# Основные свойства стали:

- **Хрупкость** – способность разрушаться при малых деформациях
- **Ползучесть** – свойство материала непрерывно деформироваться во времени без увеличения нагрузки (обычно при высоких температурах)
- **Твердость** – свойство поверхностного слоя металла сопротивляться упругой и пластической деформациям или разрушению при внедрении в него индентора из более твердого материала
- **Усталость** – разрушение стали при действии циклических меняющихся по направлению действия (растяжение-сжатие) напряжений
- **Ударная вязкость (КС)** – склонность металла к хрупкому разрушению, определяемая по результатам испытаний в маятниковых копрах. Под действием удара молота копра образец разрушается. Ударная вязкость **КС** определяется затраченной на разрушение образца работой, отнесенной к площади поперечного сечения, и измеряется в Дж/см<sup>2</sup>

# Ударная вязкость

Для **сопоставимости** результатов испытания проводятся на стандартных образцах при определенных температурах. Для тонкого металла используют образцы толщиной **5 мм**. Один и тот же материал может разрушаться как **вязко**, т. е. с развитием значительных пластических деформаций, так и **хрупко**, в зависимости от целого ряда факторов. Для ужесточения условий испытаний и повышения концентрации напряжений в образцах делают надрез (U- или V-образный) или трещину. В местах надреза напряжения резко повышаются (возникает концентрация напряжений), что способствует переходу металла в хрупкое состояние

Таким образом, **ударная вязкость** является комплексным показателем, характеризующим состояние металла (хрупкое или вязкое), сопротивление динамическим (ударным) воздействиям и чувствительность к концентрации напряжений, и служит для сравнительной оценки качества материала

# Основные свойства стали:

- **Свариваемость** – важнейшее требование, предъявляемое к сталям строительных конструкций, поскольку сварка это основной соединения элементов стальных конструкций
- **Долговечность** стальных конструкций определяется в первую очередь коррозионной стойкостью стали. Сопротивляемость стали коррозионным повреждениям зависит от химического состава и проверяется путем длительной выдержки образцов в агрессивной среде. Мерой коррозионной стойкости служит скорость коррозии по толщине металла, мм/год
- С течением времени свойства стали несколько меняются: увеличиваются предел текучести и временное сопротивление, снижается пластичность, сталь становится более хрупкой, это явление называется **старением стали**

# Технологические свойства стали

При изготовлении и монтаже стальных конструкций широко используются такие операции, как **гибка, резка, строжка, сверление** отверстий, связанные с процессами упругопластического изгиба, скалывания, обработки резанием, термическим воздействием. Для качественного выполнения этих операций сталь должна иметь соответствующие технологические свойства. Так, повышенная твердость затрудняет сверление и механическую резку, недостаточная вязкость приводит к возникновению в гнутых деталях **трещин**, термическое воздействие ускоряет процесс **старения** стали и способствует ее переходу в хрупкое состояние

Оценка **технологических** свойств стали производится по **химическому** составу. В зависимости от содержания отдельных элементов устанавливается режим огневой резки и сварки

# Химический состав сталей

Сталь	Содержание элементов, %							
	углерода, не более	марганца	кремния	серы, не более	фосфора, не более	хрома, не более	ванадия	других элементов
С235	0,22	≤ 0,6	≤ 0,05	0,05	0,04	0,3	—	—
С245, С275	0,22	≤ 0,65	0,05—0,15	0,05	0,04	0,3	—	—
С255, С285	0,22 0,22 0,2	≤ 0,65 0,8—1,1 0,8—1,1	0,15—0,3 0,05—0,15 0,15—0,3	0,05	0,04	0,3	—	—
С345, С375	0,15	1,3—1,7	≤ 0,8	0,04	0,035	0,3	—	—
С390	0,18	1,20—1,6	≤ 0,6	0,04	0,035	0,4	0,07—0,12	Азот 0,015—0,025
С440	0,2	1,3—1,7	≤ 0,6	0,04	0,035	0,4	0,08—0,14	Азот 0,015—0,025
С590	0,15	1,3—1,7	0,4—0,7	0,035	0,035	0,3	0,07—0,15	Молибден 0,15—0,25

# Механические характеристики сталей

Для листового проката по ГОСТ 27772 в таблице:

Отличительной особенностью ГОСТ 27772 является использование для некоторых сталей (С275, С285, С375) статистических методов контроля, что гарантирует обеспечение нормативных значений предела текучести и временного сопротивления

Сталь	Механические характеристики			Ударная вязкость $KCU$ , Дж/см <sup>2</sup>				Марка-аналог по другим стандартам
	$\sigma_y$ , кН/см <sup>2</sup>	$\sigma_u$ , кН/см <sup>2</sup>	$\delta_5$ , %	$t = -20^\circ\text{C}$	$t = -40^\circ\text{C}$	$t = -70^\circ\text{C}$	после механического старения	
С235	22,5—23,5	36	25—26	—	—	—	—	Вст3кп2
С245	23,5—24,5	37	24—25	—	—	—	28	Вст3пс6
С255	23,5—25,5	37—38	24—26	29	—	—	29	Вст3сп5, Вст3Гпс5
С275	26,5—27,5	37—39	23—24	—	—	—	29	Вст3пс6-2
С285	26,5—28,5	38—39	23—24	29	—	—	29	Вст3сп5-2, Вст3Гпс5-2
С345 (Т)	30,5—34,5	46—49	21	—	34	29	29	09Г2С, 14Г2, 12Г2С, ВстГпс
С345	26,5—34,5	43—49	20—21	—	34	29	29	09Г2, 15ХСНД, 14Г2
С390	39	54	20	—	—	29	—	14Г2АФ, 10Г2С1 т.о., 10ХСНД
С440	41—44	57—59	20	—	—	29	—	16Г2АФ
С590	59	68,5	14	—	34	—	—	12Г2СМФ



# Оценку свариваемости стали

Проводят по **углеродному** эквиваленту, %:

$$C_э = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Cr}{5} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cu}{13} + \frac{V + Nb}{14} + \frac{Mo}{4} + \frac{P}{2},$$

где C, Mn, Si, Cr, Ni, Cu, V, Nb, Mo, P – массовая доля углерода, марганца, кремния, хрома, никеля, меди, ванадия, ниобия, молибдена, фосфора, %

Если  $C_э \leq 0,4$  %, то сварка стали не вызывает затруднений, при  $0,4 < C_э \leq 0,55$  % сварка возможна, но требует принятия специальных мер по предотвращению возникновения трещин. При  $C_э > 0,55$  % опасность появления трещин резко возрастает

Для проверки **сплошности** металла и предупреждения **расслоя** в необходимых случаях согласно проектных требований проводится **ультразвуковой** контроль

# Группы конструкций

В зависимости от **условий работы** материала:

- **Группа 1.** Сварные конструкции или их элементы, работающие в особо тяжелых условиях (согласно ГОСТ 25546), в том числе максимально стесняющих развитие пластических деформаций, или подвергающиеся непосредственному воздействию динамических, вибрационных или подвижных нагрузок (балки крановых путей; балки рабочих площадок; балки путей подвешеного транспорта; элементы конструкций бункерных и разгрузочных эстакад, непосредственно воспринимающих нагрузки от подвижных составов; главные балки и ригели рам при динамической нагрузке; пролетные строения транспортерных галерей; фасонки ферм; стенки, крайки днищ, кольца жесткости, плавающие крыши, покрытия резервуаров и газгольдеров; бункерные балки; оболочки параболических бункеров; стальные оболочки свободно стоящих дымовых труб; сварные специальные опоры больших переходов линий электропередачи (ВЛ) высотой более 60 м; элементы оттяжек мачт и оттяжечных узлов)

# Группы конструкций:

- **Группа 2.** Сварные конструкции либо их элементы, работающие при статической нагрузке при наличии растягивающих напряжений (фермы; ригели рам; балки перекрытий и покрытий; косоуры лестниц; оболочки силосов; опоры ВЛ, за исключением сварных опор больших переходов; опоры ошиновки открытых распределительных устройств подстанций (ОРУ); опоры транспортерных галерей; прожекторные мачты; элементы комбинированных опор антенных сооружений (АС) и другие растянутые, растянуто-изгибаемые и изгибаемые элементы), а также конструкции и их элементы **группы 1** при отсутствии сварных соединений и балки подвесных путей из двутавров по ГОСТ 19425 при наличии сварных монтажных соединений

# Группы конструкций:

- **Группа 3.** Сварные конструкции либо их элементы, работающие при статической нагрузке, преимущественно на сжатие (колонны; стойки; опорные плиты; элементы настила перекрытий; конструкции, поддерживающие технологическое оборудование; вертикальные связи по колоннам с напряжениями в расчетных сечениях связей свыше  $0,4R_y$ ; анкерные, несущие и фиксирующие конструкции (опоры, ригели жестких поперечин, фиксаторы) контактной сети транспорта; опоры под оборудование ОРУ, кроме опор под выключатели; элементы стволов и башен АС; колонны бетоновозных эстакад; прогоны покрытий и другие сжатые и сжато-изгибаемые элементы), а также конструкции и их элементы **группы 2** при отсутствии сварных соединений

# Группы конструкций:

- **Группа 4.** Вспомогательные конструкции зданий и сооружений (связи, кроме указанных в **группе 3**; элементы фахверка; лестницы; трапы; площадки; ограждения; металлоконструкции кабельных каналов; вспомогательные элементы сооружений и т.п.); сооружения класса **КС-1** (ГОСТ 27751) - теплицы; парники; здания, в которых не предусматривается постоянное пребывание людей (мобильные сборно-разборные и контейнерного типа, временные склады и сооружения с ограниченным сроком службы, шпунтовые ограждения котлованов, временные опоры и т. п.), а также конструкции и их элементы **группы 3** при отсутствии сварных соединений

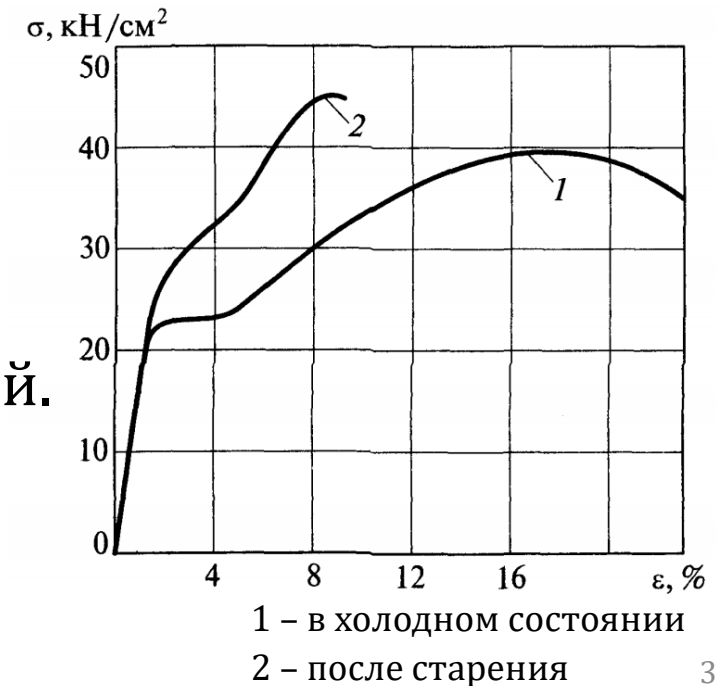
Примечания: **1.** При назначении стали для конструкций зданий и сооружений класса **КС-3** (ГОСТ 27751) номер группы конструкций следует уменьшать на единицу (для групп 2-4); **2.** При толщине проката  $t > 40$  мм номер группы конструкций следует уменьшать на единицу (для групп 2-4). При толщине проката  $t \leq 6$  мм – увеличивать на единицу (для групп 1-3)

# Факторы, влияющие на свойства стали

**Старение.** Перестройка структуры стали за счет расположения углерода в местах дефектов кристаллической решетки приводит к повышению предела текучести и временного сопротивления и уменьшению пластичности и сопротивления хрупкому разрушению, что заметно растянуто во времени и поэтому называется **старением**. Способствуют данному явлению:

- Развитие пластических деформаций
- Температурные колебания

**Старение** снижает сопротивление динамическим воздействиям и хрупкому разрушению, поэтому рассматривается как явление **отрицательное** для сталей. Наиболее подвержены старению стали, загрязненные и насыщенные газами, например кипящая сталь



# Факторы, влияющие на свойства стали

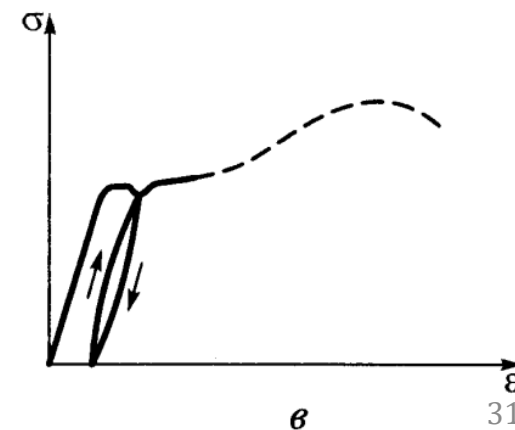
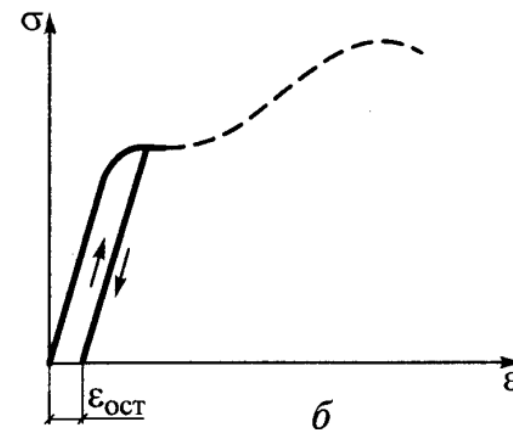
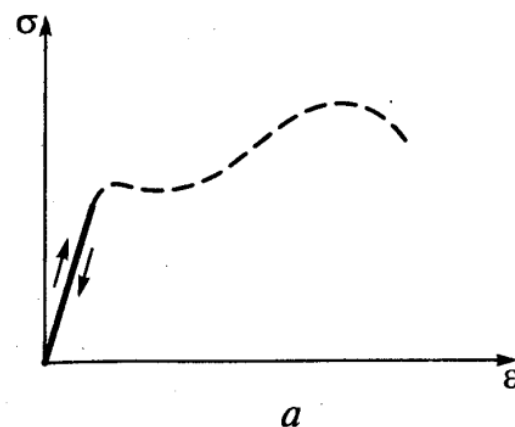
**Наклеп.** Повторные загрузки в пределах упругих деформаций не изменяют вида диаграммы работы стали, нагрузка и разгрузка будут происходить по одной линии – рис. а). Если образец загрузить до пластического состояния и затем снять нагрузку, то появится остаточная деформация  $\varepsilon_{ост}$  – рис. б)

При повторном нагружении образца после некоторого «отдыха» материал работает упруго до уровня *предыдущего* нагружения. Повышение упругой работы материала в результате предшествующей пластической деформации называется **наклепом**. Пластичность стали снижается, повышается опасность хрупкого разрушения, что неблагоприятно сказывается на работе строительных конструкций

а – в пределах упругих деформаций

б – с перерывом (после «отдыха»)

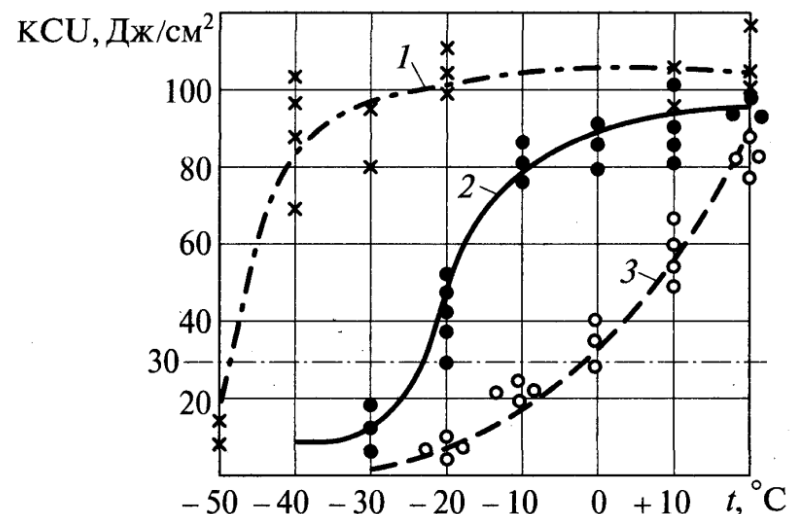
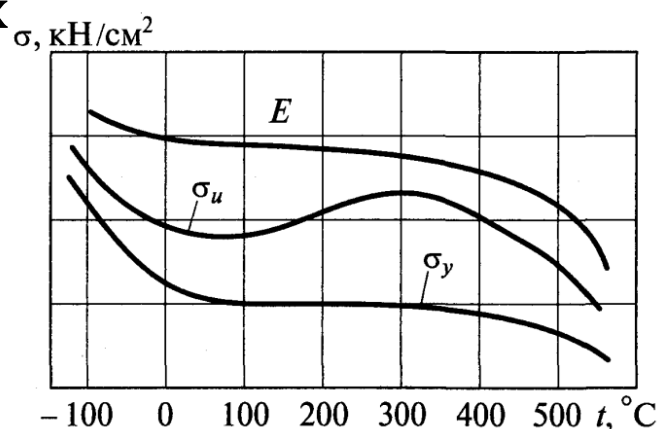
в – без перерыва



# Факторы, влияющие на свойства стали

**Влияние температуры.** Механические свойства стали при нагревании ее до температуры **200-250 °С** практически не меняются – рис. а). При температуре **250-300 °С** прочность стали несколько повышается, пластичность снижается. Сталь в изломе имеет крупнозернистое строение и становится более хрупкой (синеломкость). Не следует при этой температуре деформировать сталь или подвергать ее ударным воздействиям. Нагревание выше температуры **400 °С** приводит к резкому падению предела текучести и временного сопротивления, а при температуре **600-650 °С** наступает температурная пластичность и сталь теряет свою несущую способность

При отрицательных температурах прочность стали **возрастает**, временное сопротивление и предел текучести **сближаются**, ударная вязкость падает и сталь становится **хрупкой**



1 – сталь 10Г2С1; 2 – сталь С255; 3 – сталь С235



# Виды и механизм разрушения стали

Разрушение стали в зависимости от степени развития пластических деформаций может быть **хрупким** или **пластичным** (вязким)

**Хрупкое** разрушение происходит путем отрыва – рис. **а**), без заметных деформаций, внезапно. **Пластичное** разрушение является результатом **сдвига** – рис. **б**) и сопровождается значительными деформациями, которые могут быть своевременно обнаружены, и поэтому менее опасно

а – отрыв; б – срез;

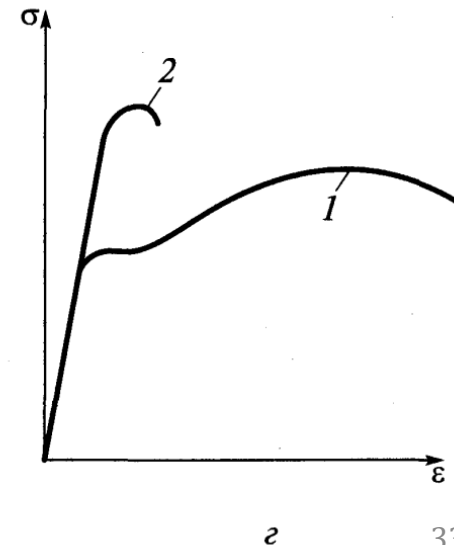
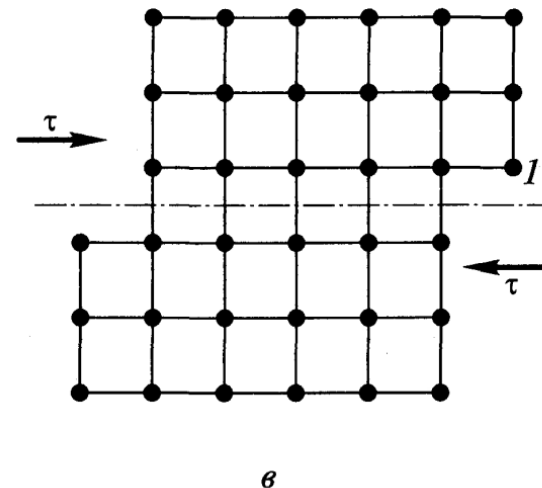
в – схема смещения атомных слоев при сдвиге:

1 – плоскость скольжения

г – диаграмма работы материала:

1 – вязкое разрушение

2 – хрупкое разрушение



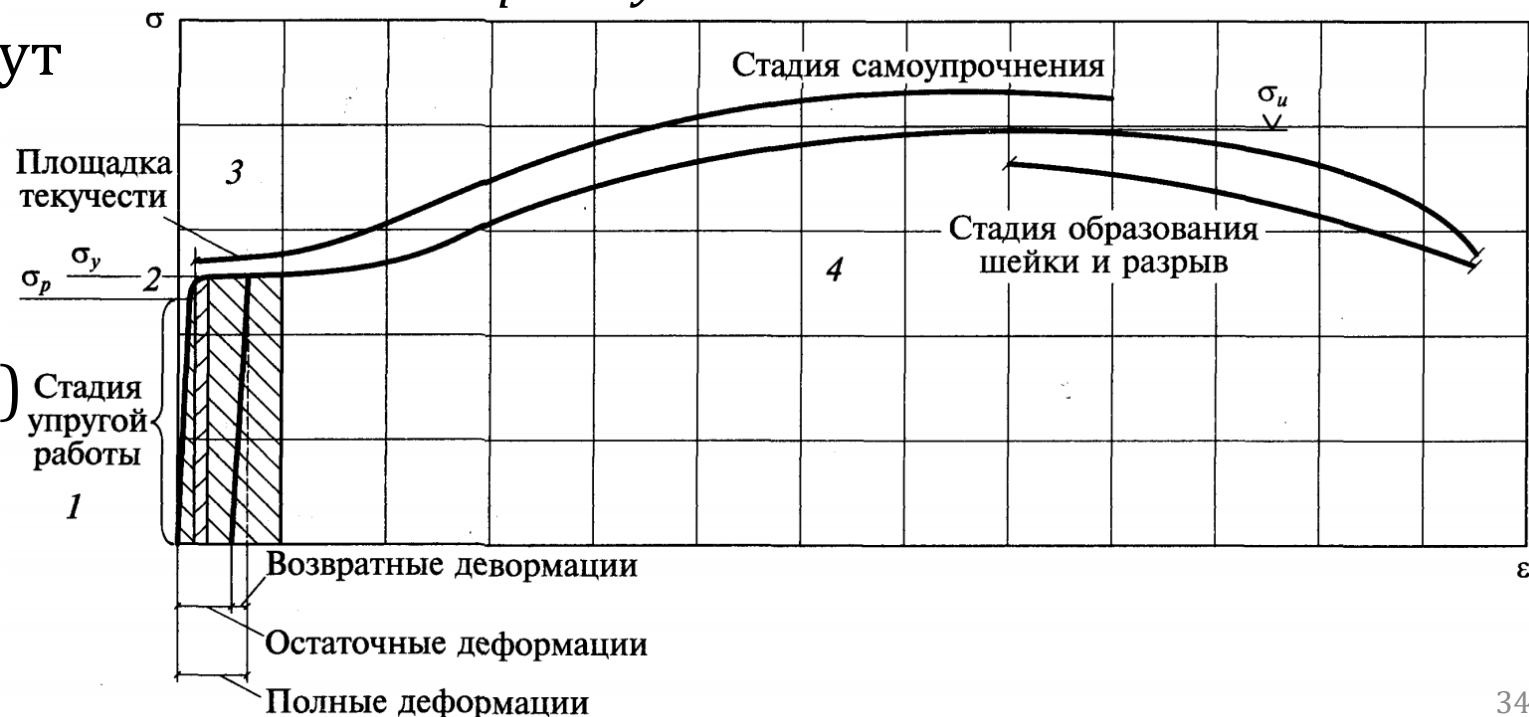
# Работа стали при одноосном растяжении

В **стадии 1** (упругой работы) до предела пропорциональности  $\sigma_p$  связь между напряжениями и деформациями подчиняется закону Гука

В **стадии 2** (при дальнейшем увеличении нагрузки) прямая пропорциональность между напряжениями и деформациями нарушается (участок упругопластической работы между  $\sigma_p$  и  $\sigma_y$ )

В **стадии 3** деформации растут при постоянной нагрузке, появляется **площадка текучести** (1,5-2,5 %)

В **стадии 4** (самоупрочнения) рост деформаций возможен только при увеличении нагрузки



# Работа при сложном напряженном состоянии

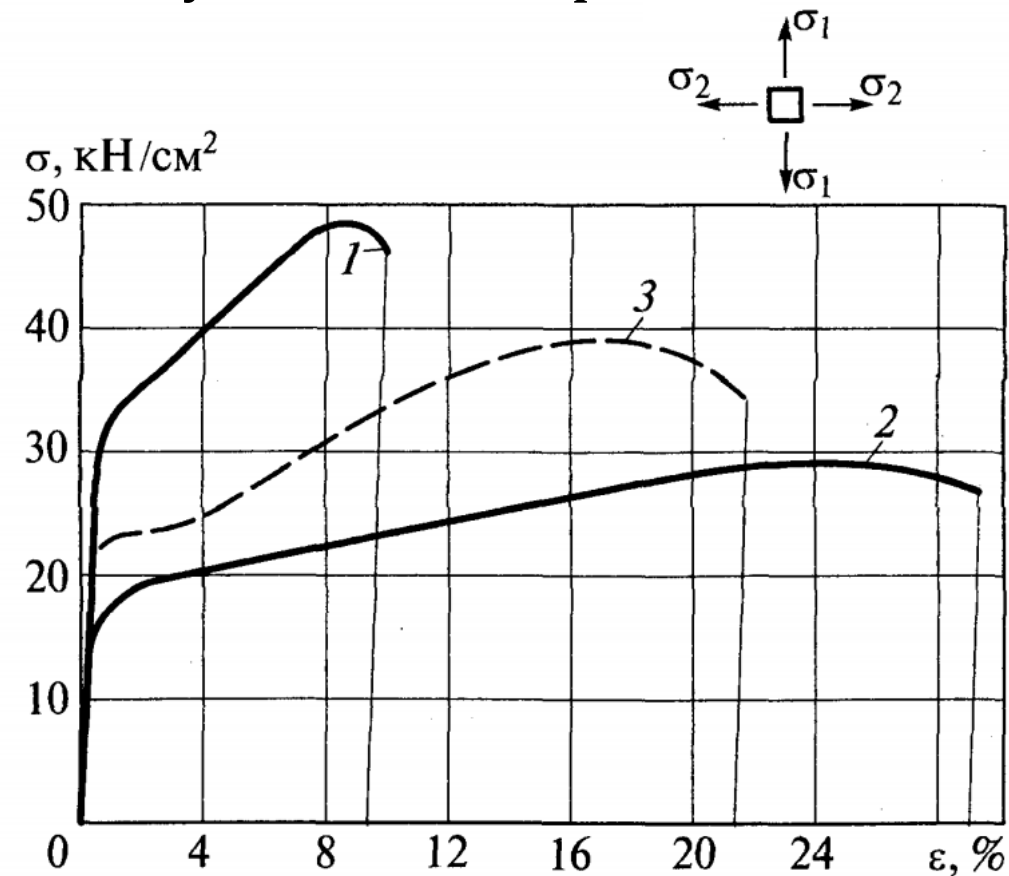
Сложное напряженное состояние характеризуется наличием двух или трех **главных** нормальных напряжений  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  и  $\sigma_3$ , действующих одновременно

Если при **одноосном** напряженном состоянии ( $\sigma_1 \neq 0, \sigma_2 = \sigma_3 = 0$ ) пластические деформации развиваются при напряжениях, равных **пределу текучести**, то при **сложном** напряженном состоянии переход в пластическое состояние зависит от **знака** и **соотношения** значений действующих напряжений

1 – однозначное поле напряжений

2 – разнозначное поле напряжений (сжатие в одном и растяжение в другом направлении)

3 – одноосное растяжение

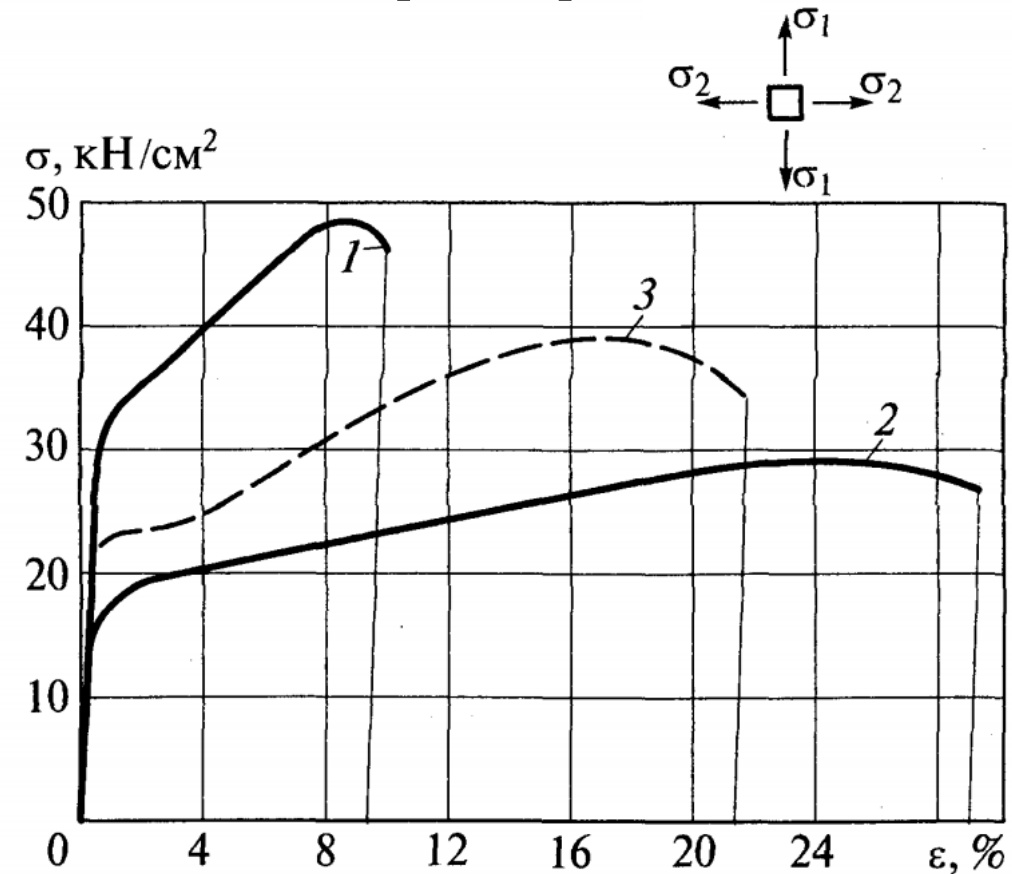


# Работа при сложном напряженном состоянии

Условие перехода материала в **пластическое** состояние при сложном напряженном состоянии устанавливается на основании теории прочности

Исследования показывают, что переход стали из упругого состояния в пластическое может быть достаточно близко описан как третьей теорией прочности – теорией **касательных напряжений**, так и четверной теорией – **энергетической**

- 1 – однозначное поле напряжений
- 2 – разнозначное поле напряжений (сжатие в одном и растяжение в другом направлении)
- 3 – одноосное растяжение



# Потенциальная энергия

Накапливаемая при деформировании материала от внешних воздействий, используется в качестве **критерия эквивалентности** при сравнении одноосного и сложного напряженных состояний

Математическое выражение этой энергии представляет собой инвариант **тензора напряжений**, т. е. энергия деформирования остается **постоянной** для различных соотношений компонентов напряжений, связанных законами механики деформируемого твердого тела

Приравнивая общее выражение **энергии** его частному значению при **одноосном** напряженном состоянии, можно получить искомое правило **эквивалентности**

Для удобства анализа энергию деформации можно представить в виде суммы работ по изменению объема  $A_0$  и изменению формы тела  $A_\phi$

# Энергия деформации

Работа по изменению объема  $A_o$  не превышает 13 % полной работы при упругом деформировании и зависит от среднего нормального напряжения:

$$A_o = \frac{1 - 2\nu}{6E} (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)^2$$

Работа по изменению формы тела  $A_\phi$  связана со сдвигами в материале:

$$A_\phi = \frac{1 + \nu}{3E} [\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - (\sigma_x \cdot \sigma_y + \sigma_y \cdot \sigma_z + \sigma_z \cdot \sigma_x) + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)]$$

где  $\nu$  и  $E$  – коэффициент Пуассона и модуль упругости стали

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  – нормальные напряжения;  $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$  – касательные напряжения

Разрушение **кристаллической структуры** строительных сталей связано со сдвиговыми явлениями в материале, поэтому при определении несущей способности материала работу по изменению объема можно не учитывать

# Энергетическая эквивалентность

Работа формоизменения  $A_\phi$  является инвариантом, поэтому при **одноосном** напряженном состоянии  $\sigma_x = \sigma$  и остальных компонентов равных нулю:

$$A_\phi = \frac{1 + \nu}{3E} \sigma^2$$

Приравнивая работы  $A_\phi$  для одноосного и сложного напряженного состояний:

$$\frac{1 + \nu}{3E} \sigma^2 = \frac{1 + \nu}{3E} \left[ \sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - (\sigma_x \cdot \sigma_y + \sigma_y \cdot \sigma_z + \sigma_z \cdot \sigma_x) + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \right]$$

$$\sigma = \sigma_{\text{пр}} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - (\sigma_x \cdot \sigma_y + \sigma_y \cdot \sigma_z + \sigma_z \cdot \sigma_x) + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}$$

Это соотношение устанавливает **энергетическую эквивалентность** сложного напряженного состояния одноосному. Выражение в правой части иногда называют **приведенным напряжением**  $\sigma_{\text{пр}}$ , имея в виду приведение к некоторому состоянию с одноосным напряжением

# Приведенные напряжения

В стенках двутавровых балок вблизи приложения поперечной нагрузки  $\sigma_x \neq 0$ ,  $\sigma_y \neq 0$  и  $\tau_{xy} \neq 0$ , остальными компонентами напряжений можно пренебречь, тогда условие пластичности принимает вид:

$$\sigma_T = \sigma_{пр} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y + 3\tau_{xy}^2}$$

В точках, удаленных от места приложения нагрузки, можно пренебречь также локальным напряжением  $\sigma_y = 0$ , тогда условие пластичности еще упростится:

$$\sigma_T = \sigma_{пр} = \sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2}$$

При **простом сдвиге** из всех компонентов напряжений только  $\tau_{xy} \neq 0$ , тогда:

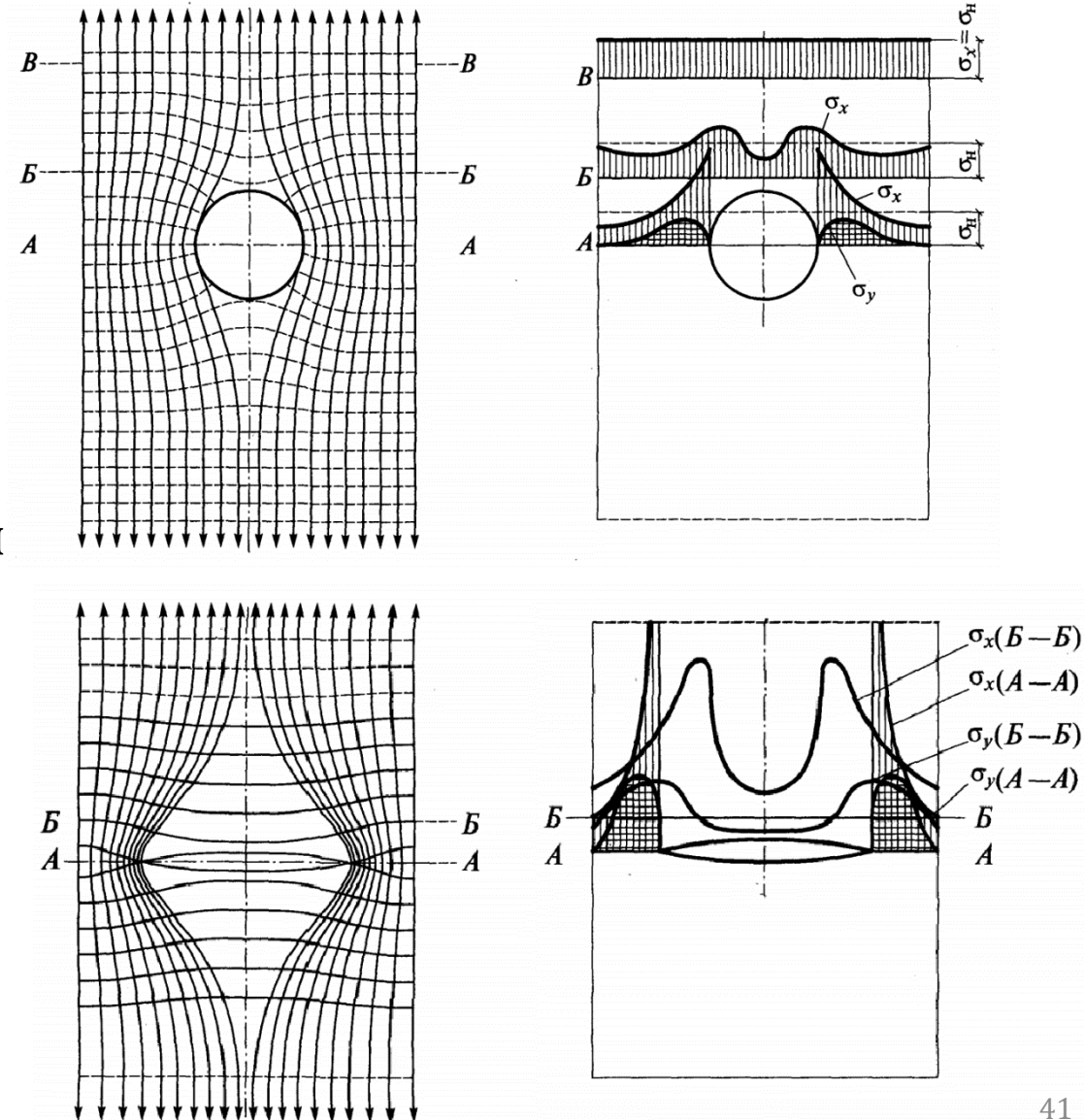
$$\sigma_T = \sigma_{пр} = \sqrt{3\tau_{xy}^2} \rightarrow \tau_{xy} = \sigma_T \sqrt{3} \rightarrow R_s = 0,58R_y$$



# Концентрация напряжений

При растяжении гладкого образца правильной формы напряжения во всех сечениях, удаленных от места приложения нагрузки, распределяются **равномерно** и траектории главных напряжений **прямолинейны**

В местах **искажения** сечения (у отверстий, выточек, надрезов, трещин и т.д.) линии главных напряжений **искривляются** и, обтекая границы, **сгущаются**. Сгущение траекторий главных напряжений характеризует **повышение** напряжений в этих местах, а их искривление свидетельствует о появлении **двух главных** напряжений  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ , т. е. о возникновении **плоского** напряженного состояния. При большой толщине элемента возникает **третье** главное напряжение  $\sigma_3$ , напряженное состояние будет **объемным**



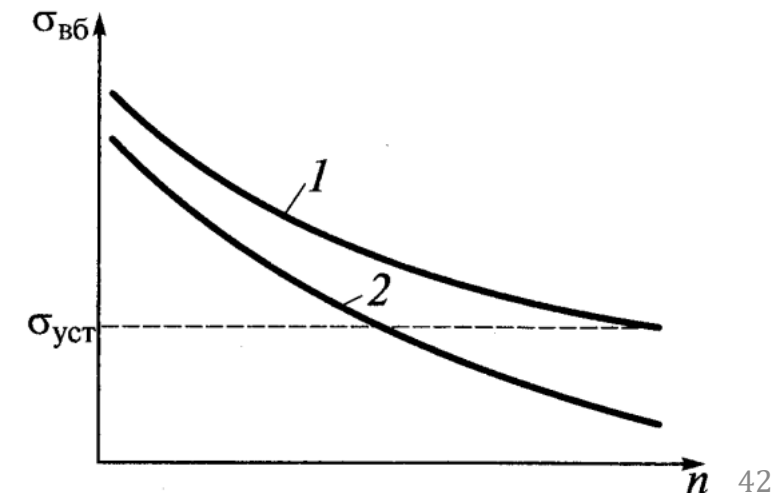
# Работа при повторных нагрузках

При работе материала в упругой стадии повторное нагружение не отражается на работе материала, поскольку упругие деформации обратимы

При повторном нагружении металла в упругопластической области возникает **наклеп**. Область упругой работы увеличивается, пластичность падает, и сталь становится более **хрупкой**

Многократное (миллионы раз) повторное нагружение может привести к разрушению при напряжениях меньше, чем временное сопротивление и даже предел текучести. Это явление называется **усталостью** металла, а разрушение – **усталостным**

Зависимость вибрационной прочности  $\sigma_{вб}$  от числа циклов  $n$ : для стали (1) и алюминиевых сплавов (2)



# Выносливость стали

Способность металла сопротивляться усталостному разрушению называется **выносливостью**, а напряжения, при которых происходит разрушение, – **вибрационной прочностью**  $\sigma_{вб}$

Вибрационная прочность  $\sigma_{вб}$  зависит от числа циклов нагружения  $n$ , вида нагружения, который характеризуется **коэффициентом асимметрии**

$\rho = \sigma_{min}/\sigma_{max}$  – соответственно наименьшее и наибольшее напряжение

При большом числе циклов кривая вибрационной прочности асимптотически приближается к некоторому пределу, называемому **пределом выносливости** (усталости)

Характеристики циклов нагружений:

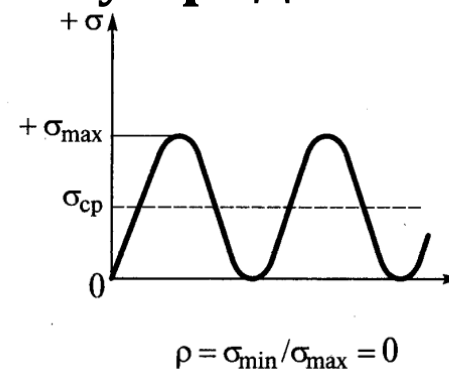
а) – однозначный

б) – полный однозначный

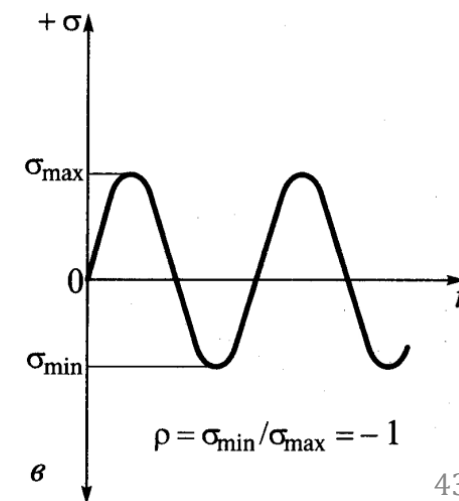
в) – полный разнозначный (симметричный)



а



б



в

# Предел усталости

При изменении коэффициента асимметрии цикла от +1 (постоянная нагрузка) до -1 (полный симметричный цикл) усталостная прочность падает

Для низкоуглеродистой стали при  $\rho = 0$  предел усталости равен пределу текучести, а при  $\rho = -1$  составляет примерно  $0,6\sigma_y$ . На предел выносливости влияет и вид напряжений: при преобладании сжатия он выше

Для низколегированных сталей (С345-С390) предел усталости приближается к пределу текучести при  $\rho = 0,25$ , а при полном симметричном цикле составляет  $0,5\sigma_y$ , т. е. относительная усталостная прочность ( $\sigma_{уст}/\sigma_y$ ) с повышением прочности стали снижается

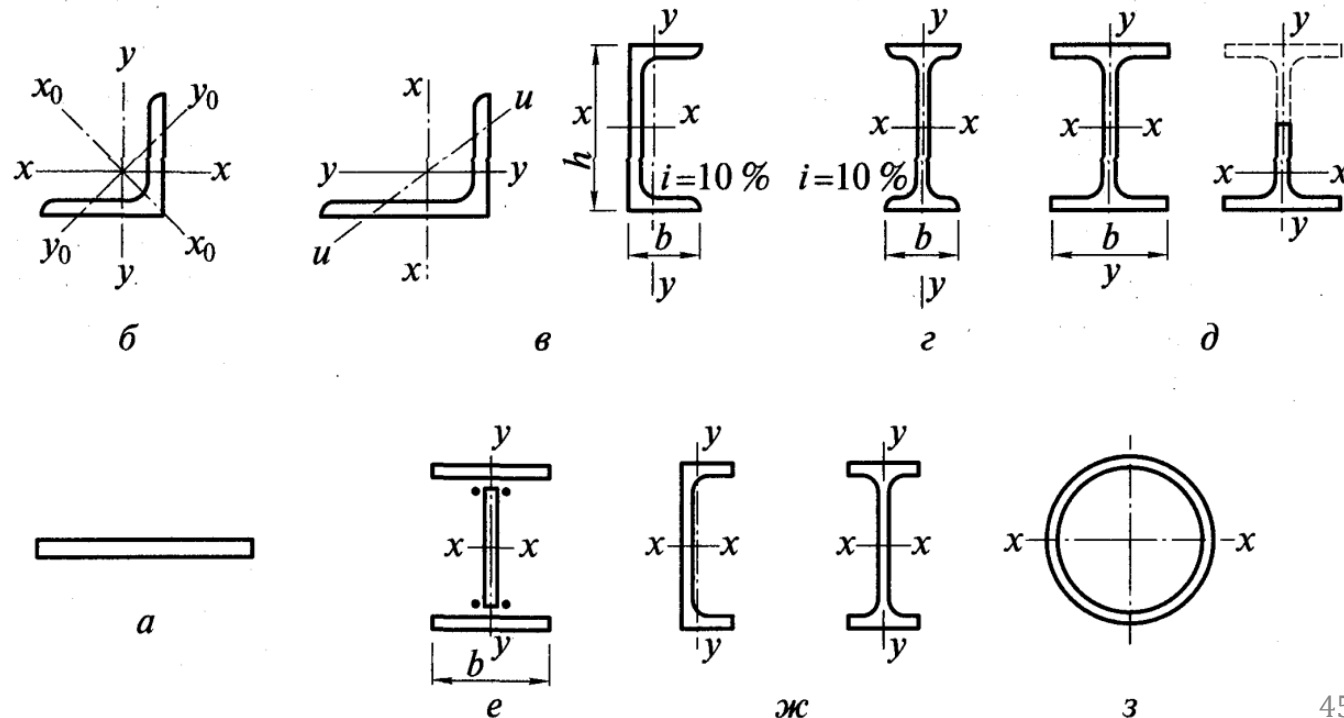
Обычно усталость наблюдается в конструкциях, испытывающих миллионы циклов нагружения. Это явление называется **многоцикловой** усталостью

Если циклические напряжения превышают предел текучести, то разрушение может произойти и при числе циклов порядка нескольких тысяч. Такое разрушение называется **малоцикловой** усталостью

# Элементы стальных конструкций

Первичным элементом стальных конструкций является прокатная сталь, которая выплавляется на металлургических заводах. Прокатная сталь, применяемая в стальных конструкциях, подразделяется на две группы:

- Сталь листовую – рис. а):  
тонколистовую,  
толстолистовую,  
широкополосную,  
универсальную и просечно-вытяжную
- Сталь фасонную рис. б)... з):  
уголки, швеллеры,  
двутавры, тавры, трубы и т.п.

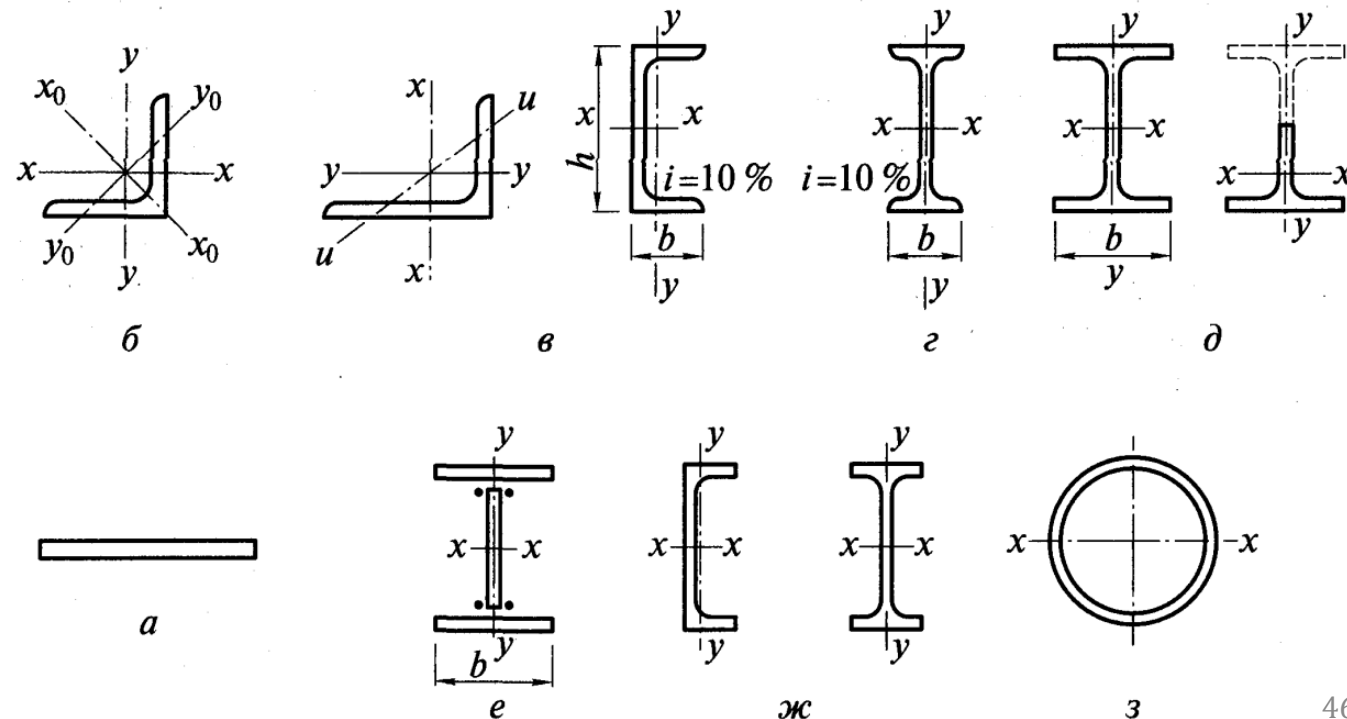


# Сортамент стальных элементов

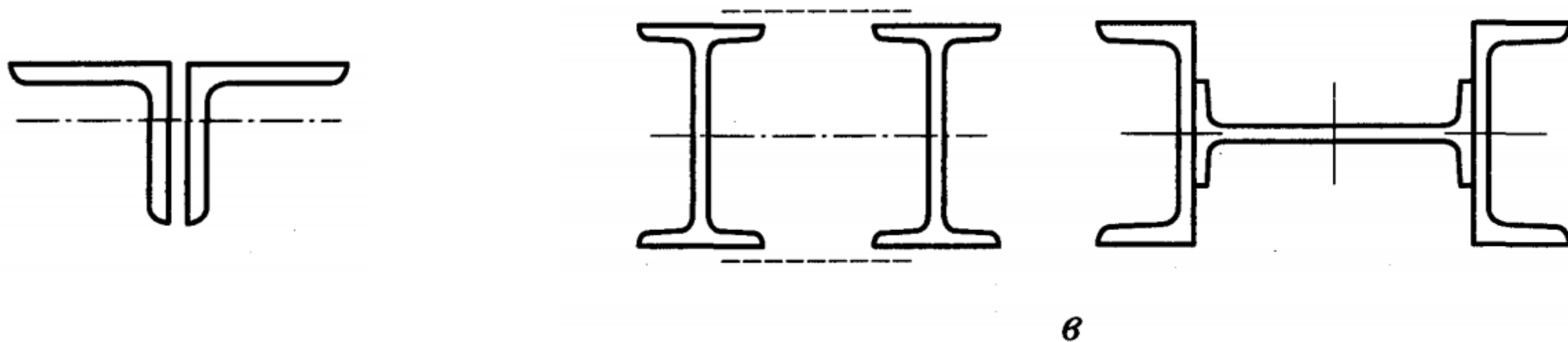
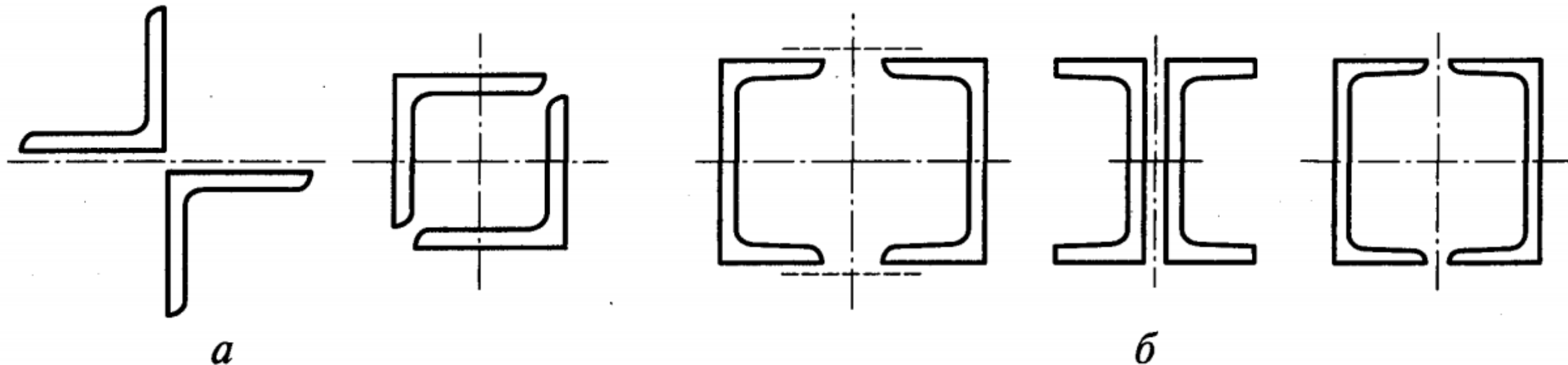
Перечень прокатных профилей с указанием формы, геометрических характеристик, массы единицы длины, допусков и условий поставки называется **сортаментом**. Разнообразие видов профилей, входящих в сортамент, а также достаточно частая градация размеров одного вида профиля обеспечивают экономичное проектирование конструкций при возможности создания разнообразных конструктивных форм

Коэффициент градации  
(отношение площади сечения данного профиля  $A_n$  и площади сечения ближайшего меньшего  $A_{n-1}$ ) в каждом сортаменте имеет переменное значение

В области наиболее применяемых профилей коэффициент градации меньше

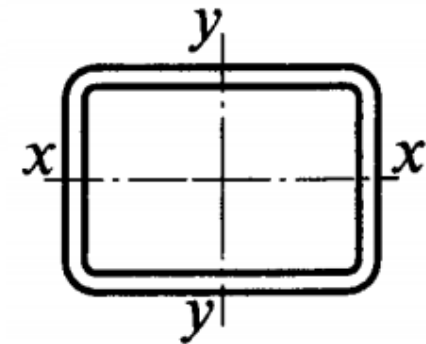
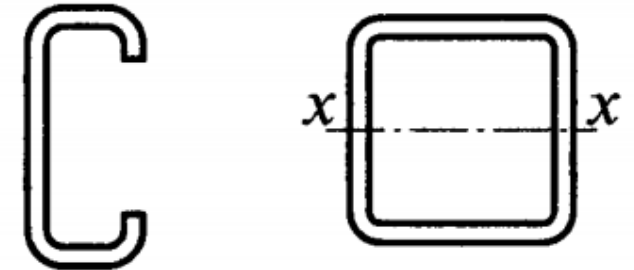
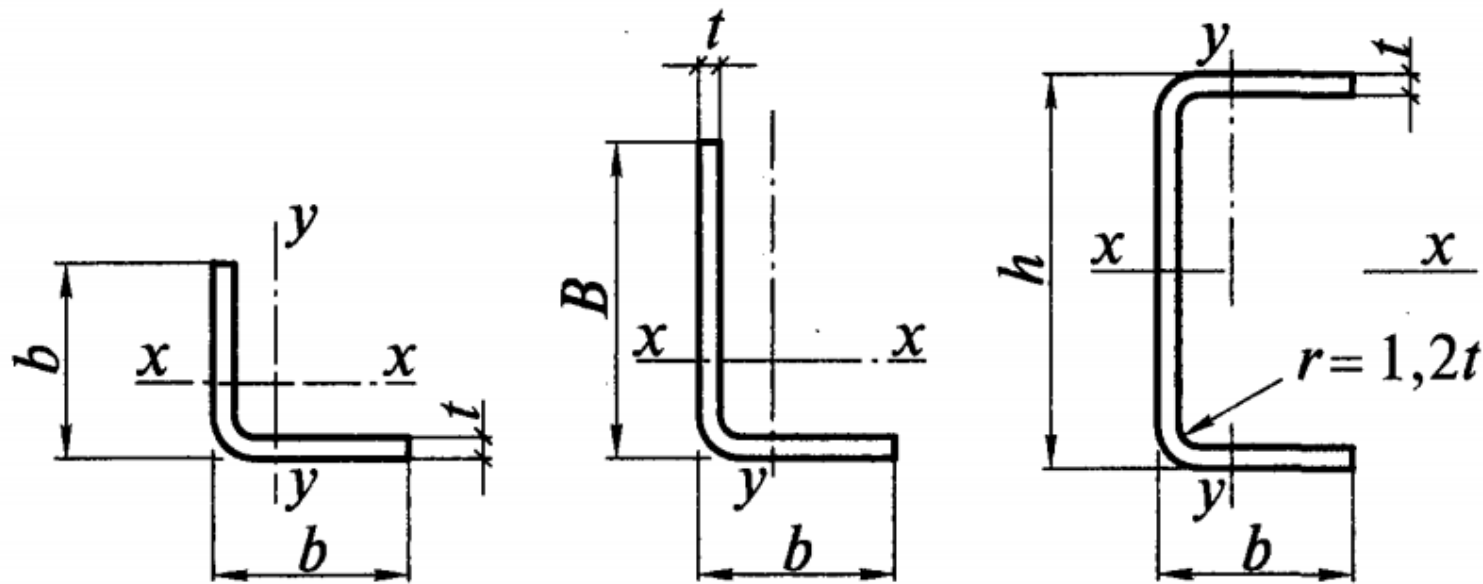


# Компоновка сечений из прокатных профилей





# Холодногнутые профили





# Литература:

- ГОСТ 27772-2015 Прокат для строительных стальных конструкций. Общие технические условия
- ГОСТ 25546-82 Краны грузоподъемные. Режимы работы
- ГОСТ 19425-74 Балки двутавровые и швеллеры стальные специальные
- ГОСТ 27751-2014 Надежность строительных конструкций и оснований
- СП 16.13330.2017 Стальные конструкции
- Кудишин Ю.И., Беленя Е.И., Игнатьева В.С. [и др.]. Металлические конструкции: Учебник для студ. учреждений высш. проф. образования. – 13-е изд., испр. – М.: Издательский центр «Академия», 2011. – 688 с.

**ИФО | 01.03.04 | ПМ | 6-й семестр**

# **Строительные конструкции**

## **Лекция №14**



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ

**СТРОИТЕЛЬНЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ**

www: [mgsu.ru/universityabout/Struktura/Kafedri/ZhBK/](http://mgsu.ru/universityabout/Struktura/Kafedri/ZhBK/)

e-mail: [gbk@mgsu.ru](mailto:gbk@mgsu.ru); [dpekin@mail.ru](mailto:dpekin@mail.ru)

тел.: +7 495 287 49 14 доб. 3036, 3084

Пекин Дмитрий Анатольевич, доцент, к.т.н.