

Лекция

Сварные соединения

Доцент кафедры
самолетостроения
к.т.н. Д.В.Мухин

Учебные вопросы

1. Общие сведения о сварных соединениях
2. Соединения дуговой сваркой
3. Соединения контактной сваркой
4. Расчет сварных соединений при переменном нагружении

1. Общие сведения о сварных соединениях

Сварные соединения – это неразъемные соединения, основанные на использовании сил молекулярного сцепления и получаемые путем местного нагрева деталей до расплавленного состояния (сварка плавлением электродуговая, электрошлаковая и др.) или до тестообразного состояния, но с применением механической силы (контактная сварка) .

Дуговая сварка металлическим электродом осуществляется электрической дугой между электродом и изделием. Выделяемое тепло оплавляет соединяемые детали и расплавляет электрод (или присадочный материал), который дает дополнительный металл для формирования шва.

Область применения:

Основным способом механизированной дуговой сварки, обеспечивающим высокое качество шва, производительность и экономичность процесса, является **автоматическая сварка под слоем флюса**. Она применяется в широком диапазоне толщин свариваемых элементов и допускает соединение деталей как из обычных конструкционных, так и из высокопрочных, коррозионно-стойких, жаропрочных сталей, а также из алюминиевых и титановых сплавов.

Применение автоматической сварки эффективно в серийном производстве и для конструкций с длинными швами. Для конструкций с короткими разбросанными швами применяют **полуавтоматическую шланговую сварку**, а при малом объеме сварочных работ — **ручную дуговую сварку**.

Для сварки металлических деталей малой толщины, деталей из высоколегированных сталей, цветных металлов и сплавов получили распространение **дуговая сварка в среде защитных газов, сварка в углекислом газе и аргонодуговая сварка**.

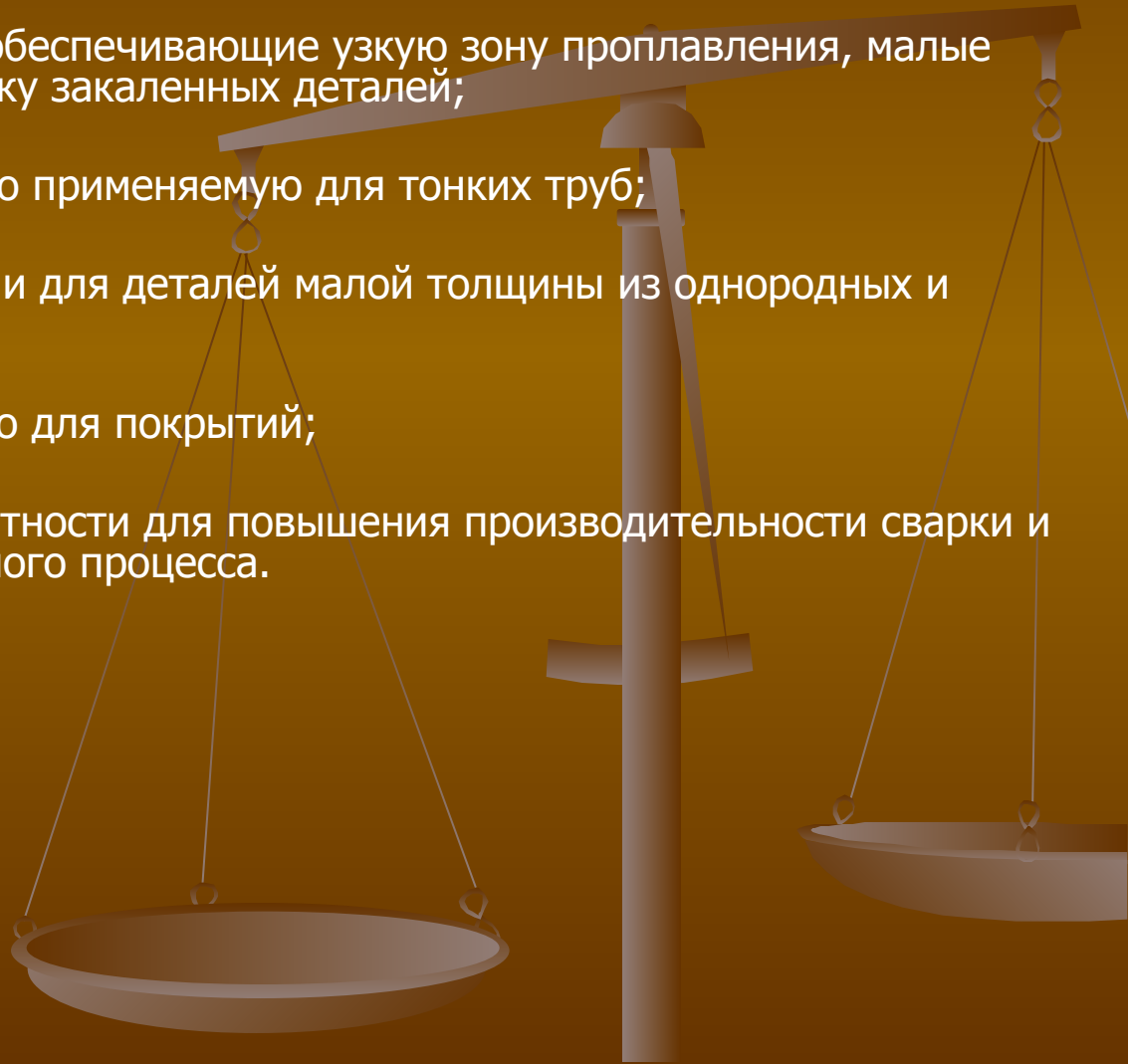
Электрошлаковая сварка так же, как и дуговая, представляет собой сварку плавлением; при прохождении тока через шлаковую ванну от электрода к изделию выделяется теплота, расплавляющая основной и присадочный материалы. Электрошлаковая сварка предназначена для соединения деталей толщиной от 30 мм до 1...2 м. Электрошлаковая сварка позволяет заменять сложные тяжелые цельнолитые и цельнокованные конструкции сварными из поковок, отливок или листов, позволяет формировать переходные поверхности (галтели), что значительно облегчает и удешевляет производство. Электрошлаковую сварку применяют, в частности, для чугуновых отливок.

Контактная сварка основана на разогреве стыка теплотой, выделяющейся при пропускании через него электрического тока, и сдавливании деталей. Контактную сварку применяют преимущественно в серийном и массовом производствах.

При сварке трением используется теплота, выделяемая в процессе относительного движения свариваемых деталей, преимущественно тел вращения.

Специальные виды сварки:

- диффузионная, позволяющую соединять разнородные материалы и обеспечивающую минимальное изменение свойств соединения по сравнению со свойствами основных материалов;
- электронно-лучевая и лазерная, обеспечивающие узкую зону проплавления, малые деформации и позволяющие сварку закаленных деталей;
- радиочастотная, преимущественно применяемую для тонких труб;
- ультразвуковая в приборостроении для деталей малой толщины из однородных и разнородных металлов;
- сварка взрывом, преимущественно для покрытий;
- существенные перспективы, в частности для повышения производительности сварки и резки, дает применение плазменного процесса.



Используемые электроды

Э38, Э42, Э46, Э50 – обычные;
Э42А, Э46А, Э50А – с повышенной пластичностью и ударной вязкостью.

Цифра после Эх10 – сопротивление шва в МПа.

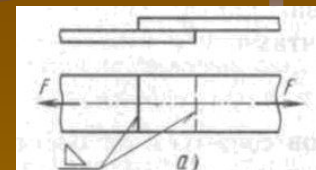
для сварки углеродистых и низколегированных конструкционных сталей с временным сопротивлением разрыву до 60 кгс/мм² - **У**;
для сварки легированных конструкционных сталей с временным сопротивлением разрыву свыше 60 кгс/мм² - **Л**;
для сварки легированных теплоустойчивых сталей - **Т**;
для сварки высоколегированных сталей с особыми свойствами - **В**;
для наплавки поверхностных слоев с особыми свойствами - **Н**.

Сварные соединения по взаимному расположению соединяемых элементов можно разделить на группы:

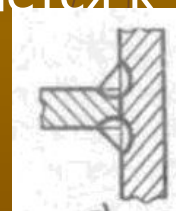
1. Соединения стыковые. Соединяемые элементы являются продолжением один другого, сварку производят по торцам.



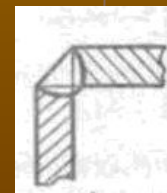
2. Соединения нахлесточные. Боковые поверхности соединяемых элементов частично перекрывают одна другую.



3. Соединения тавровые. Соединяемые элементы перпендикулярны или реже наклонны один к другому. Один элемент торцом приваривается к боковой поверхности другого.



4. Соединения угловые. Соединяемые элементы перпендикулярны или наклонны один к другому и привариваются по кромкам.



Применение стыковых соединений, как наиболее близких к целым деталям, расширяется, а применение нахлесточных — сокращается.

Преимущества сварных соединений:

1. Применение сварных конструкций обеспечивает существенную экономию металла по сравнению с клепаными и литыми.

Экономия металла по сравнению с клепаными конструкциями получается в основном ввиду:

- полного использования рабочих сечений соединяемых элементов без ослабления их отверстиями для заклепок;
- возможности непосредственного соединения элементов без вспомогательных деталей (накладок).

Общая экономия металла составляет в среднем 15...20 %.

Экономия металла по сравнению с литыми конструкциями достигается благодаря:

- более высоким механическим свойствам материалов и меньшим остаточным напряжениям;
- более тонким стенкам;
- меньшим припускам на механическую обработку.

Общая экономия металла составляет в среднем 50 % по сравнению с чугунами и 30% по сравнению со стальными изделиями.

2. Малая трудоемкость процесса.

3. Относительно низкая стоимость оборудования.

(по сравнению с кузнечным или литейным)

4. Возможность автоматизации.

5. Снижение стоимости изготовления сложных деталей в условиях единичного или мелкосерийного производства.

Недостатки сварных соединений:

1. Вероятность возникновения при сварке плавлением различных дефектов швов, снижающих прочность соединений (особенно при переменном нагружении);



2. Низкая прочность соединений вследствие неправильного выбора параметров технологического процесса;
3. Необходимость проведения для всех сварных швов визуального контроля, а для сварных изделий ответственного назначения — неразрушающего инструментального контроля (ультразвуковой, рентгеновский и др.) или выборочного разрушающего;
4. Возникновение остаточных напряжений (вследствие термических деформаций от неравномерного нагрева) снижает прочность и вызывает необходимость проведения в ряде случаев механической обработки после старения (изменение свойств металла во времени вследствие внутренних процессов);
5. Местный нагрев вызывает в зоне термического влияния вблизи шва изменение механических свойств металла.

Наличие дефектов, зоны влияния, остаточные напряжения и возможное изменение геометрической формы обуславливают возникновение концентрации напряжений при нагружении и вызывают снижение циклической прочности сварного соединения, оцениваемое эффективным коэффициентом концентрации напряжений:

$$K_{\sigma} = \frac{\sigma_{-1d}}{\sigma_{-1D}}$$

где σ_{-1d} — предел выносливости образца без концентрации напряжений, площадь поперечного сечения которого совпадает с площадью поперечного сечения сварной детали: σ_{-1D} — предел выносливости сварной детали натуральных размеров.

Основным условием проектирования является равнопрочность шва и соединяемых деталей

2. Соединения дуговой сваркой

2.1 Стыковые соединения дуговой сваркой



а) Сварка с отбортовкой при $\delta \leq 1 \text{ мм}$

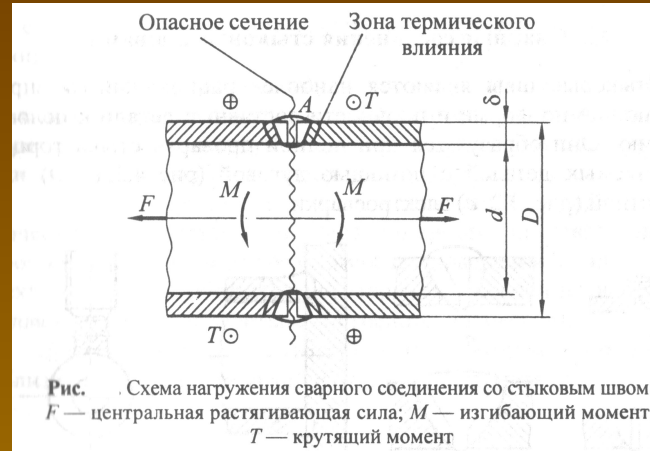
б) Сварка без скоса кромок двусторонним швом при $\delta = 1..6 \text{ мм}$

в) Сварка односторонним швом на флюсовой прокладке при $\delta = 1..6 \text{ мм}$

г, д) Сварка со скосами различной формы при $\delta \geq 4 \text{ мм}$

е) Сварка с четырьмя скосами при $\delta \geq 6 \text{ мм}$

Расчет сварных стыковых швов на статическую прочность проводят по эквивалентным напряжениям σ_E в опасном сечении, испытывающем напряженное состояние.



Для определения σ_E обычно используют четвертую теорию прочности

$$\sigma_E = \sqrt{(\sigma_p + \sigma_n)^2 + 3\tau^2} \leq [\sigma']_p$$

где $\sigma_p = \frac{F}{A_c}$ Нормальные напряжения растяжения или сжатия

$\sigma_n = \frac{M}{W}$ Наибольшие нормальные напряжения изгиба (в зоне A)

$\tau = \frac{T}{W_p}$ Наибольшие касательные напряжения кручения (в зоне A)

A_c, W, W_p — площадь сечения шва и осевой и полярный моменты сопротивления шва

Для случая тонкостенной трубы

$$\sigma_P = \frac{F}{A_c} = \frac{4F}{\pi(D^2 - d^2)}$$

$$\sigma_H = \frac{M}{W} = \frac{M}{0,1D^3 \left(1 - \frac{d^4}{D^4}\right)}$$

$$\tau = \frac{T}{W_p} = \frac{T}{0,2D^3 \left(1 - \frac{d^4}{D^4}\right)}$$

1. Допускаемые напряжения для сварных швов соединений из низкоуглеродистых и низколегированных сталей

Напряженное состояние	Тип шва	Способ сварки	Допускаемое напряжение
Растяжение, сжатие $[\sigma]_p$	Стыковой	Дуговая автоматическая и полуавтоматическая под флюсом, в CO_2	$[\sigma]_p$
		Дуговая ручная электродами Э42А, Э46А, Э50А Контактная, электронно-лучевая, диффузионная	
Срез $[\tau]_{cp}$	Угловой	Дуговая автоматическая и полуавтоматическая под флюсом, в CO_2	$0,8[\sigma]_p$
	Стыковой	Дуговая ручная	$0,65[\sigma]_p$
	Угловой		$0,6[\sigma]_p$

2.2 Нахлесточные, тавровые, угловые соединения дуговой сваркой

Нахлесточные, тавровые, угловые соединения выполняются угловыми швами.

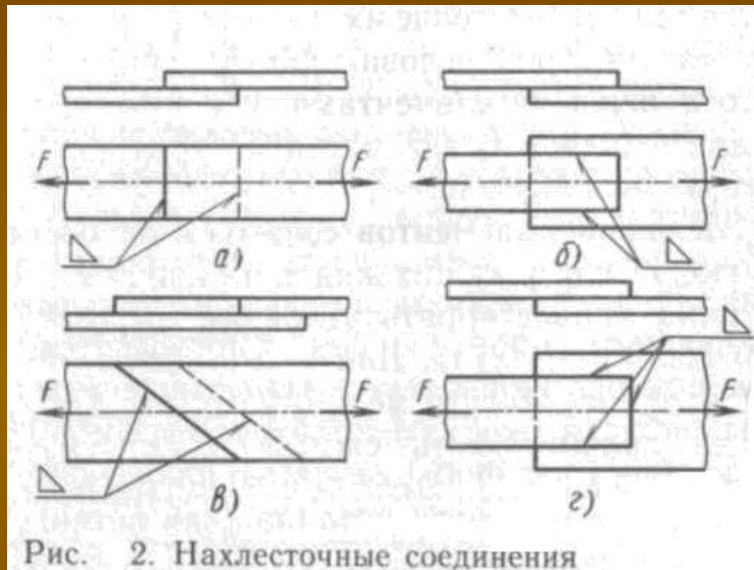


Рис. 2. Нахлесточные соединения

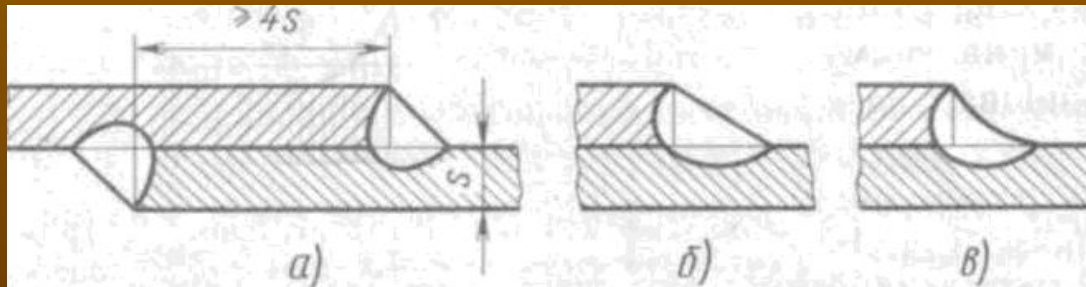


Рис. Формы сечений угловых швов

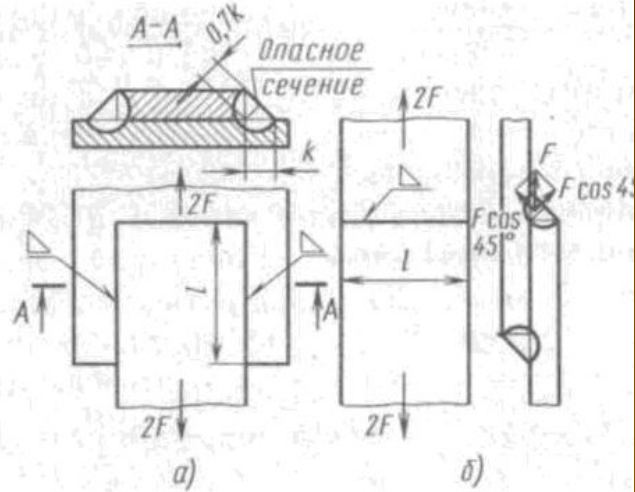


Рис. . Расчетные схемы угловых швов:
а — флангового; б — лобового

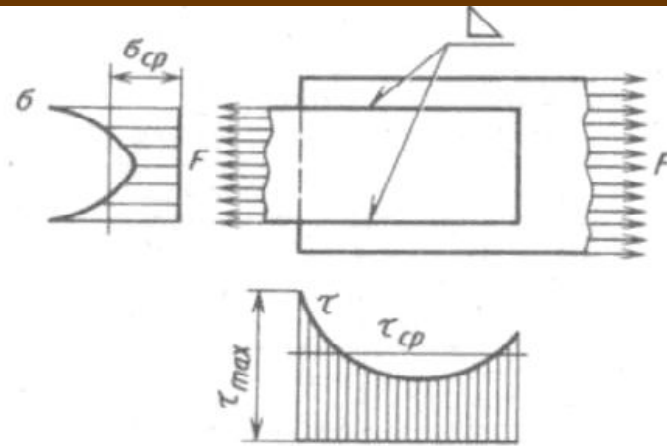


Рис. Схема распределения напряжений
во фланговых угловых швах и в поперечном
сечении полосы

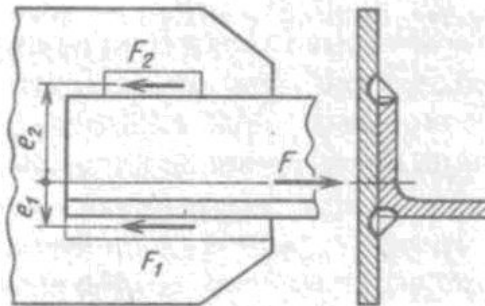


Рис. Фланговые швы в соединениях несимметричных элементов, нагруженных осевой силой

$$F_1 = \frac{e_2}{e_1 + e_2} F$$

$$F_2 = \frac{e_1}{e_1 + e_2} F$$

$$\frac{l_{\phi 1}}{l_{\phi 2}} = \frac{e_2}{e_1}$$

Условие статической прочности при нагружении силой, проходящей через ЦТ:

$$\tau_F = \frac{F}{A} \leq [\tau']$$

Исходя из условий равнопрочности основного металла и сварных швов

Для **фланговых** швов:

$$\begin{aligned} [F]_{OM} &= [F]_{ШИ}; \\ [\sigma]_p \delta_{\min} b &= [\tau'] p L; \end{aligned}$$

С учетом:

$$\begin{aligned} [\tau'] &= 0,6[\sigma]_p; \\ p &= 0,7k; \\ k &= \delta_{\min}; \\ L &= 2l; \end{aligned}$$

получаем

$$l = 1,2b$$

Для **косых** швов:

$$\begin{aligned} [F]_{OM} &= [F]_{ШИ}; \\ [\sigma]_p \delta_{\min} b &= [\tau'] p L; \end{aligned}$$

С учетом:

$$\begin{aligned} [\tau'] &= 0,6[\sigma]_p; \\ p &= 0,7k; \\ k &= \delta_{\min}; \\ L &= 2b / \cos \alpha; \end{aligned}$$

получаем

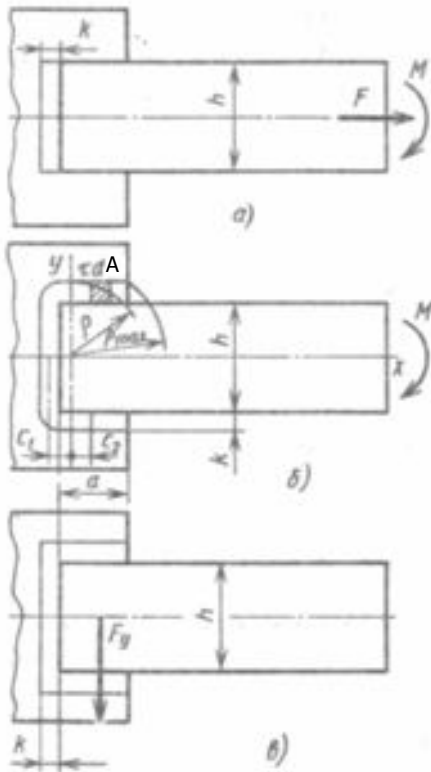
$$\begin{aligned} \cos \alpha &= 0,84 \\ \alpha &= 36,5^\circ \end{aligned}$$

Для **лобовых** швов
условие
равнопрочности не
соблюдается

Для комбинированных
швов
(лобовой+фланговый)

$$l = 0,7b$$

Нагружение угловых швов моментом, действующим в плоскости стыка



$$\frac{\tau_T}{\rho} = \frac{\tau_{T\max}}{\rho_{\max}} \Rightarrow \tau_T = \frac{\rho \cdot \tau_{T\max}}{\rho_{\max}}$$

$$dF = \tau_T dA$$

$$dT = \rho \tau_T dA$$

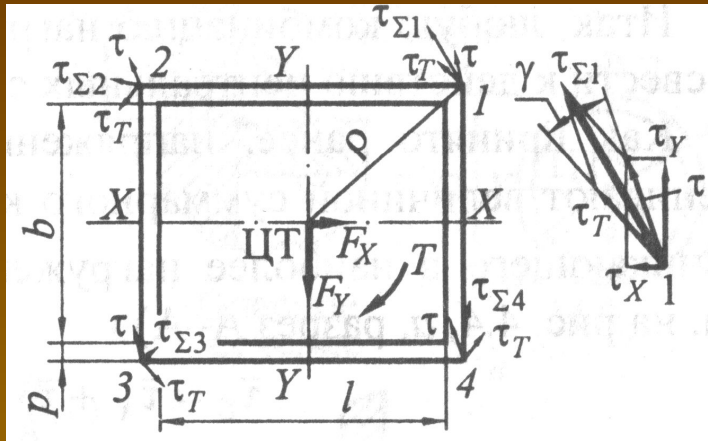
$$T = \int_A dT = \int_A \rho \tau_T dA = \frac{\tau_{T\max}}{\rho_{\max}} \int_A \rho^2 dA = \frac{\tau_{T\max}}{\rho_{\max}} J_p$$

$$J_p = J_x + J_y$$

$$\tau_{T\max} = \frac{T \cdot \rho_{\max}}{J_p} \leq [\tau']$$

Рис. Расчетные схемы угловых швов, нагруженных в плоскости сварки

Совместное нагружение угловых швов силами и моментом, действующим в плоскости стыка

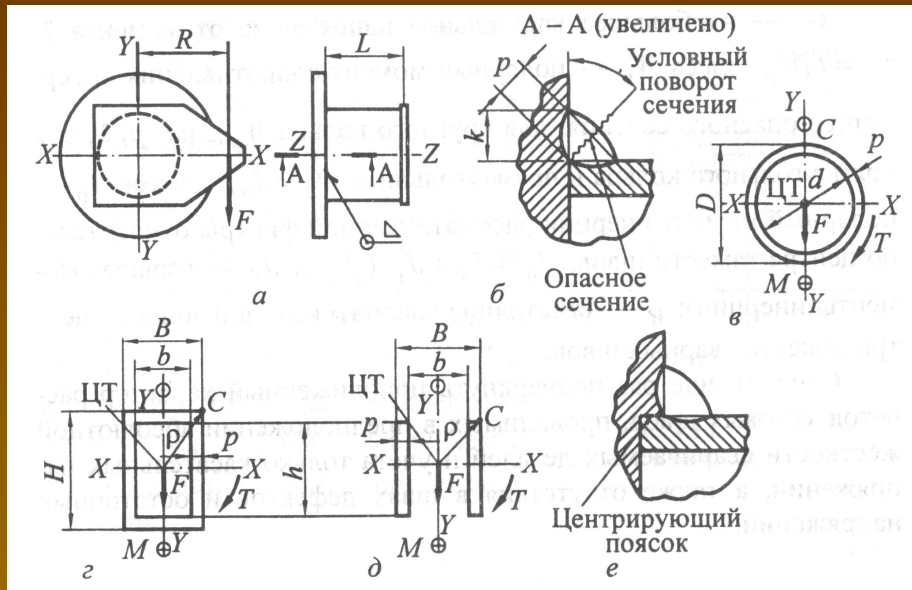


$$\bar{\tau}_{\Sigma} = \bar{\tau}_X + \bar{\tau}_Y + \bar{\tau}_T$$

$$\tau = \sqrt{\tau_X^2 + \tau_Y^2}$$

$$\tau_{\Sigma 1} = \sqrt{\tau^2 + \tau_T^2 + 2\tau \cdot \tau_T \cos \gamma} \leq [\tau']$$

Расчет тавровых соединений



$$T = FR;$$

$$M = FL;$$

$$\tau_{\Sigma} = \sqrt{\tau_F^2 + \tau_M^2 + \tau_T^2} \leq [\tau'];$$

$$\tau_M = \frac{M}{W}; \quad \tau_T = \frac{T}{W_p}$$

$W = \frac{\pi d^2 p}{4}$	$W_p = \frac{\pi d^2 p}{2}$	$A = \pi d p$
$W = \frac{(BH^3 - bh^3)}{6H}$	$W_p = \frac{J_p}{\rho}$	$A = 2(h + b)p$
$W = \frac{ph^3}{3}$	$W_p = \frac{J_p}{\rho}$	$A = 2hp$

для круглого кольца

для прямоугольного
кольца

для двух
прямоугольников