

## Лекция 11. Неразъемные соединения

### 1. Виды сварки

Сваркой называют процесс получения неразъемного соединения металлических частей с применением местного нагрева металла до пластического или жидкого состояния. Цель нагрева – интенсифицировать процесс диффузии, необходимый для получения соединения. Различают два основных метода сварки:

- *давлением*, при котором металл деталей нагревается до пластического состояния и затем детали сжимаются;

- *плавлением*, при котором *основной* металл деталей расплавляется и вместе с *присадочным* металлом образует общую жидкую ванну, после застывания которой происходит соединение деталей.

На практике существует более полусотни способов сварки, которые можно отнести к указанным методам. Среди них такие виды как сварка взрывом, трением, электронно-лучевая, ультразвуковая, плазменная, диффузионная в вакууме и др. Наибольшее распространение в машиностроении получили следующие основные способы.

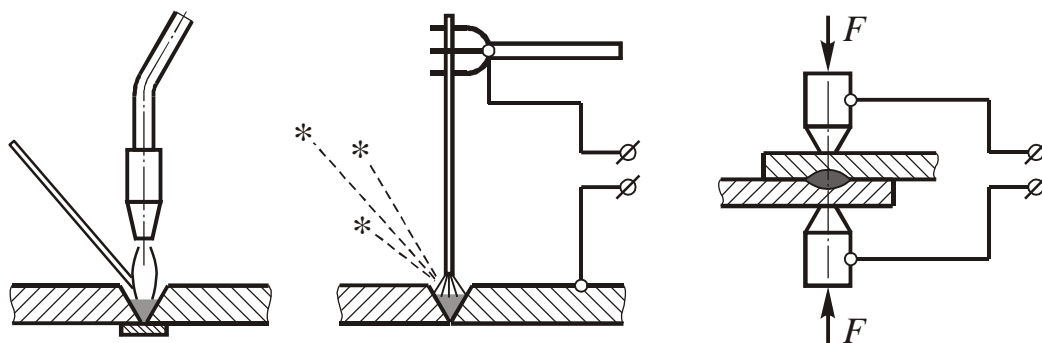
*Газовая сварка.* Этот способ заключается в оплавлении материала деталей и прутка присадочного металла высокотемпературным (до 3200°C) пламенем газовой горелки. В качестве горючего и окислителя обычно берут ацетилен и кислород. Применяется для сварки деталей малых толщин (1...5 мм) из малоуглеродистых сталей, цветных металлов, неметаллических деталей, для наплавления твердых сплавов на режущий инструмент. В условиях избыточной подачи кислорода происходит резание металла, при этом резка возможна даже под водой.

*Электродуговая сварка* – разновидность электросварки плавлением. Попытки использовать вольтову дугу для сварки были unsuccessful до 1882 года, когда русским изобретателем Н.Н. Бенардосом этот способ не был запатентован в России, а затем еще в 12 странах. Вначале использовался графитный электрод, затем стали применять металлические электроды, присадочный материал которых в основном и формирует шов. Такие электроды покрыты специальной обмазкой, способствующей образованию шлаков и газов, предохраняющих металл от воздействия атмосферного кислорода и азота.

Дуговая сварка бывает ручной и автоматизированной. Соединяют стали, чугун, алюминиевые, медные и титановые сплавы. Для защиты металла от окисления и азотирования часто применяют сварку под слоем флюса или в защитной среде инертных газов – аргона, гелия.

*Контактная сварка.* Наиболее распространены *стыковая*, *точечная* и *шовная* контактная сварки. Соединение деталей происходит за счет разогрева электротоком поверхности контакта до пластического состояния и последующего прижатия деталей друг к другу. Физический принцип контактной сварки основан на том, что электрическое сопротивление в зоне контакта существенно выше, чем в металле, за счет чего потерянная энергия электрического тока выделяется именно в этой зоне.

На том же принципе основана *электрошлаковая сварка*, где энергия выделяется в слое расплавленного шлака, заполняющего стык деталей. Данный вид сварки позволяет соединять детали толщиной до одного метра.



Способы сварки: газовая, электродуговая и контактная точечная

Области применения сварки очень обширны, что обусловлено, в первую очередь, достоинствами сварных соединений. Их широко используют в машиностроении, самолетостроении, кораблестроении, строительстве, электронной промышленности и других отраслях промышленного производства.

К достоинствам сварных соединений относят следующие:

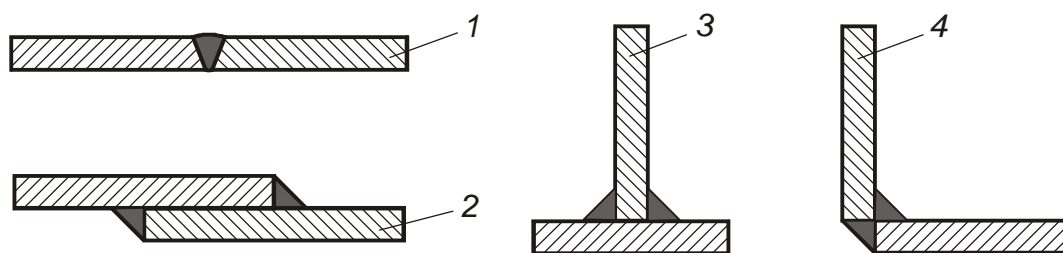
- прочность. Данный вид соединений относят к наиболее прочным в классе неразъемных соединений, лучше других приближающий контур составных деталей к цельным;
- меньший расход материала. При изготовлении корпусных и других деталей с применением сварки вместо литья уменьшается расход металла до 30% и более; замена клепаных соединений сварными также уменьшает массу конструкций до 25%;
- снижение стоимости. Применение сварки вместо других способов соединения деталей снижает стоимость изделий в 1,5 ... 2 раза.

Наряду с достоинствами сварным соединениям присущи и существенные недостатки:

- возникновение остаточных напряжений при сварке массивных деталей вследствие их неравномерного нагрева;
- коробление тонкостенных деталей, ограничивающее применение сварки при изготовлении оболочечных конструкций из прокатных листов: металлической обшивки маломерных судов, летательных аппаратов, резервуаров ...;
- наличие скрытых дефектов: шлаковых включений, газовых пузырьков, непровара и др., снижающих прочность соединений. Кроме того, дефекты вызывают концентрацию напряжений в районе их локализации, что в условиях динамического нагружения приводит к образованию и росту усталостных трещин.

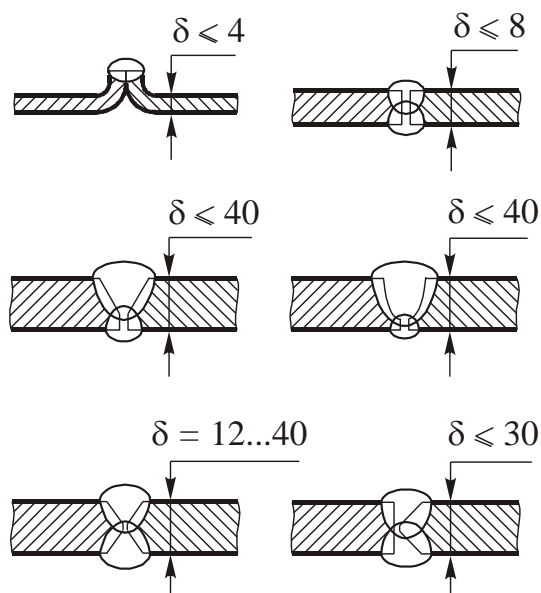
## 2. Виды сварных соединений и сварных швов

В зависимости от расположения свариваемых деталей сварные соединения делят на *стыковые*, *нахлесточные*, *тавровые*, *угловые* и др.



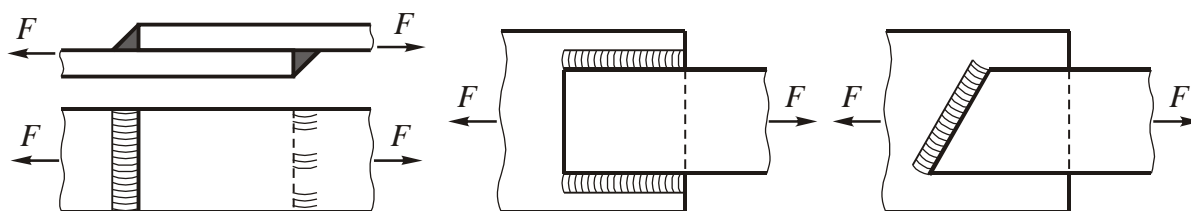
Виды сварных соединений: 1 – стыковое; 2 – нахлесточное;  
3 – тавровое; 4 – угловое

Сварные швы, которыми выполняют стыковые соединения, называют также – *стыковыми*. Швы нахлесточных, тавровых и угловых соединений называют *угловыми* (реже, *валиковыми*).



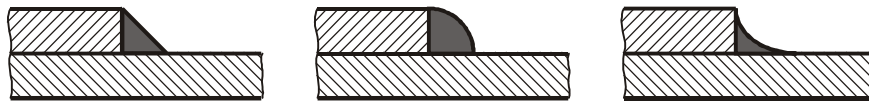
Прочность стыковых швов близка к прочности основного металла. В зависимости от толщины деталей сварку выполняют односторонним, двусторонним или односторонним с подваркой швами. Соединения встык требуют предварительной подготовки кромок деталей, поэтому их применяют для наиболее ответственных конструкций, не допускающих сварку внахлест. Кромки тонких листов вальцуют. Более толстые детали соединяют следующими швами: без скоса кромок, V-образными, U-образными, X-образными и K-образными.

Нахлесточные соединения, как указывалось, выполняют угловыми швами, которые, кроме того, различают по ориентации относительно направления внешней силы на *лобовые* ( $\perp F$ ), *фланговые* ( $\parallel F$ ), *косые* (под некоторым углом к  $F$ ) и *комбинированные*, представляющие собой различные сочетания предыдущих трех.



Виды нахлесточных швов: лобовые, фланговые, косые

Угловые швы по форме профиля делят на *нормальные*, *выпуклые* и *вогнутые* (улучшенные). Соответствующие формы сечений представлены на рисунке внизу. Вогнутые швы в сравнении с нормальными и выпуклыми швами, создают значительно меньшую концентрацию напряжений, которая, как известно, отрицательно влияет на сопротивление усталости материала. По этой причине вогнутые угловые швы применяют в соединениях, подверженных динамическим нагрузкам и вибрациям. Вогнутость обеспечивается дополнительной механической обработкой.



Профили угловых швов: нормальный, выпуклый, вогнутый

### 3. Расчет сварных соединений на прочность

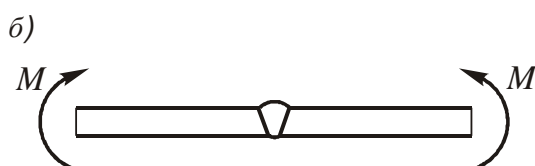
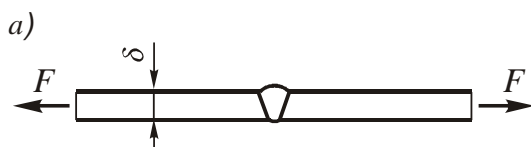
Основным критерием работоспособности сварных соединений является прочность. Для простоты расчета предполагают, что напряжения в опасных сечениях имеют равномерное распределение.

**Стыковые соединения** обычно разрушаются по шву, месту сплавления металла шва с металлом детали, по сечению самой детали в зоне термического влияния, особенно при сварке термически обработанных или наклепанных сталей. Расчет на прочность стыковых сварных соединений, работающих на растяжение – сжатие или на изгиб, производят по условию прочности стержня, поперечное сечение которого равно поперечному сечению детали без учета выпуклости шва. При этом неучет выпуклости идет в запас прочности.

Условие прочности при растяжении – сжатии

$$\sigma = \frac{F}{l\delta} \leq [\sigma'],$$

где  $F$  – растягивающая (сжимающая) нагрузка;  $l$  – длина шва;  $\delta$  – толщина детали;  $\sigma$  и  $[\sigma']$  – расчетное и допускаемое нормальные напряжения в сечении шва.



Стыковое соединение

Расчет стыковых сварных швов на прочность при изгибе ведут по формуле

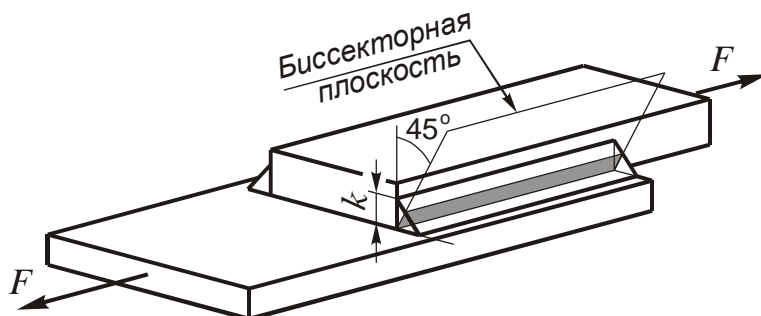
$$\sigma = \frac{M}{W_x} \leq [\sigma'_p],$$

где  $M$  – изгибающий момент в сечении шва;  $W_x$  – осевой момент сопротивления сечения изгибу. В представленном на рис. б случае

$W_x = l\delta^2 / 6$ , следовательно, условие прочности примет вид:

$$\sigma = \frac{6M}{l\delta^2} \leq [\sigma'_p].$$

**Нахлесточные соединения.** Практика показывает, что угловые швы нахлесточных соединений разрушаются в результате среза по биссекторной плоскости, независимо от ориентации шва относительно внешней нагрузки. На рисунке ниже приведена схема нагружения соединения, выполненного двумя фланговыми швами.



К определению площади среза

Как видно из рисунка, расчетная высота опасного сечения шва равна:

$$k \cos 45^\circ \approx 0,7k,$$

где  $k$  – высота катета углового шва. Площадь поверхности среза:  $A_{ср} = 0,7kl$ .

Условие прочности шва

$$\tau_c = \frac{F}{0,7kl} \leq [\tau'_c].$$

Лобовые и косые швы также разрушаются по биссекторной плоскости вследствие среза. Их рассчитывают по тому же условию. Последняя формула справедлива и для комбинированных швов. В любом случае под  $l$  понимают суммарную длину всех швов нахлесточного соединения (лобовых, фланговых и косых). Катет  $k$  может равняться или быть меньше толщины  $\delta$  детали.

Существующие нормы ограничивают длину фланговых швов интервалом  $30 \text{ мм} \leq l \leq 50k$ . Швы большей длины неэффективны в силу неравномерности распределения напряжений по длине шва. Длину лобовых и косых швов не ограничивают.

**Допускаемые напряжения** растяжения  $[\sigma'_p]$ , сжатия  $[\sigma'_c]$  и среза  $[\tau'_c]$  в сварных швах выбирают в зависимости от допускаемых напряжений на растяжение основного металла конструкции  $[\sigma_p]$  по таблице:

### Допускаемые напряжения для сварных швов

Вид технологического процесса сварки	Растяжение [ $\sigma'_p$ ]	Сжатие [ $\sigma'_c$ ]	Срез [ $\tau'_c$ ]
Автоматическая под флюсом и ручная электродами Э42А и Э50А, контактная стыковая	[ $\sigma_p$ ]	[ $\sigma_p$ ]	0,65[ $\sigma_p$ ]
Ручная дуговая электродами Э42 и Э50, газовая сварка	0,9[ $\sigma_p$ ]	[ $\sigma_p$ ]	0,6[ $\sigma_p$ ]
Контактная точечная и шовная	—	—	0,5[ $\sigma_p$ ]

Допускаемые напряжения на растяжение основного металла конструкции [ $\sigma_p$ ] выбирают по пределу текучести  $\sigma_T$ : [ $\sigma_p$ ] =  $\sigma_T / [S]$ , где допускаемый коэффициент запаса прочности берут в пределах:

[ $S$ ] = 1,35 ... 1,6 для низкоуглеродистых сталей;

[ $S$ ] = 1,5 ... 1,7 для низколегированных сталей.

### Дополнительный материал

#### Заклепочные соединения

Заклепочные соединения образуются при помощи заклепок, поставленных в специально просверленные или пробитые отверстия в соединяемых деталях. Их применяют в конструкциях, подверженных действию высоких температур, коррозии, вибрационным и ударным нагрузкам. В связи с развитием технологии сварки заклепочные соединения во многих отраслях машиностроения постепенно вытесняются сварными.

Основными материалами заклепок являются пластичные стали марок Ст2, Ст3, 10, 15, алюминиевые, медные и титановые сплавы. Главное требование к материалу – пластичность и соответствие материалу соединяемых деталей. Соблюдение последнего требования необходимо для предотвращения возникновения температурных напряжений при нагреве из-за различных коэффициентов температурного расширения, а также разрушения деталей вследствие химической коррозии.

Постановка заклепок в высверленные отверстия дает более прочные соединения (на 30 - 40%), так как края пробитых отверстий имеют микротрещины и острые кромки, подрезающие тело заклепки.

Достоинствами заклепочных соединений являются высокая надежность, хорошая сопротивляемость вибрационным и ударным нагрузкам, простота контроля качества.

К недостаткам следует отнести:

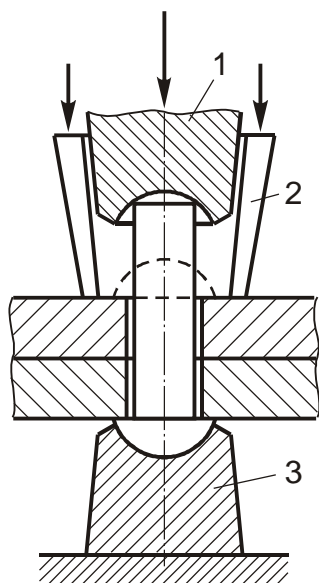
- высокую стоимость, связанную с трудоемкостью производства (разметка, сверловка, нагрев заклепок, закладка, клепка, чеканка);
- большой расход металла. Ослабление деталей отверстиями под заклепки требует увеличения сечения деталей, кроме того, необходимо учесть материал, идущий на нахлест и накладки;
- шум в процессе клепки, особенно листовых и оболочечных конструкций. Часто клепальные работы производят, защищая органы слуха наушниками.

**Технология клепки.** Клепка может производиться машинным способом, обеспечивающим стабильно высокое качество, либо вручную. Заклепки из цветных металлов, а

также стальные заклепки диаметром до 10 – 12 мм ставят в холодную, для больших диаметров клепку ведут с нагревом заклепок до температуры 1000 - 1100°C.

Заклепка представляет собой круглый стержень, на одном конце которого имеется закладная головка, которая в процессе клепки кладется на поддержку. С помощью обжимки формируется замыкающая головка.

Диаметр отверстия под заклепку делают немного большим номинального диаметра заклепки. В процессе клепки стержень заклепки осаживается и заполняет отверстие, создавая некоторый натяг. Для формирования замыкающей головки и компенсации осадки заклепка должна выступать за край отверстия на 1,4...1,7 ее диаметра.

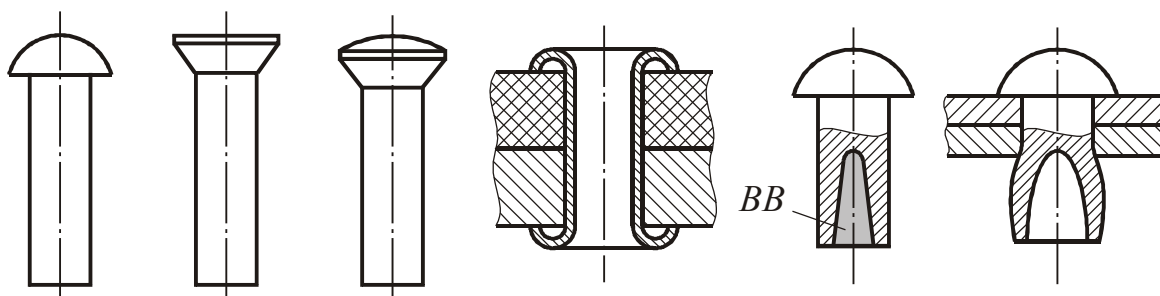


**Виды заклепок.** Некоторые виды применяемых в машиностроении заклепок приведены на рисунке внизу.

Наиболее распространены заклепки с полукруглой, потайной или полупотайной головками. Для соединения тонких листов и неметаллических материалов применяют трубчатые заклепки (пистоны), замыкающие головки которых образуются развальцовкой. Для односторонней клепки в условиях ограниченного доступа к соединению применяют пустотелые термические заклепки, у которых замыкающая головка образуется взрывом заряда при нагреве до температуры порядка 150°C.

Оснастка для клепки:

- 1 – обжимка; 2 – прижим;  
3 – поддержка

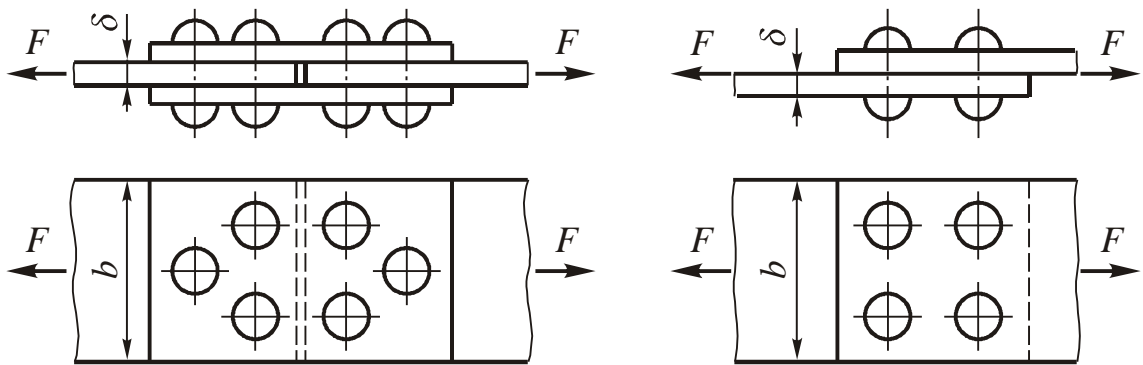


### Виды заклепочных швов

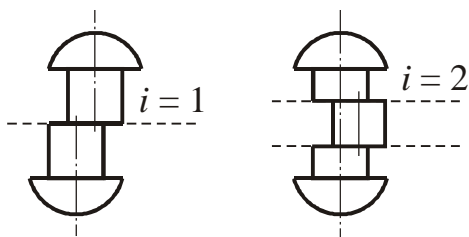
Соединение деталей, осуществляемое группой заклепок, называют заклепочным швом. По назначению различают прочные, прочноплотные и плотные швы. Прочные швы применяют в металлоконструкциях. При производстве различных резервуаров и котлов в зависимости от величины давления используют плотные и прочноплотные швы. Плотность, или герметичность швов, обеспечивается более частой постановкой заклепок, при которой исключаются зазоры в сопрягаемых плоскостях деталей. Для большей надежности плотные швы подчеканивают чеканом по кромкам деталей, а также по краям головок заклепок.

По конструктивным признакам различают следующие швы:

- *стыковые* (с одной или двумя накладками) и *нахлесточные*;
- *однорядные*, *двух-* и *многорядные*. Ряд образует группа заклепок, расположенных по линии параллельно стыку деталей. Ряд может состоять всего из одной заклепки. Количество рядов определяют по одну сторону стыка. На рисунке внизу стыковой шов – двухрядный с *шахматным* расположением заклепок. Нахлесточный шов на этом же рисунке тоже имеет два ряда, но с *рядовым* расположением заклепок;
- *односрезные* и *многосрезные* швы, в зависимости от числа  $i$  плоскостей, по которым происходит срез заклепки.



Стыковой (слева) и нахлесточный (справа) заклепочные швы



Очевидно, стыковой шов с двумя накладками является двухсрезным, а нахлесточный шов – односрезным.

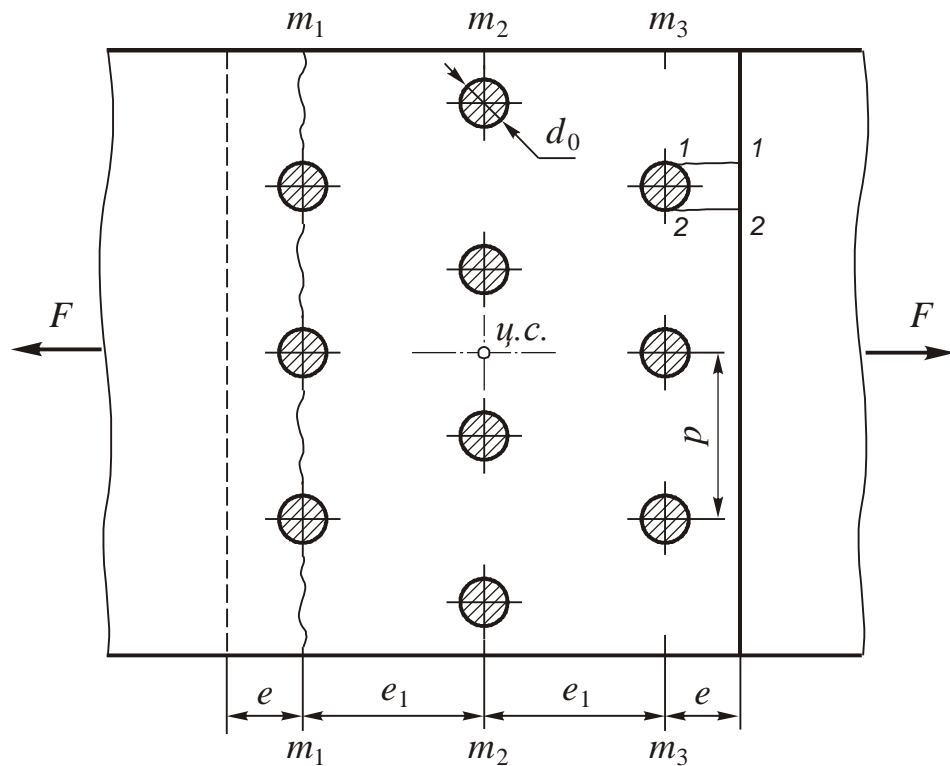
Основные геометрические параметры заклепочных швов представлены на следующем рисунке, где обозначены:

- $d_0$  – диаметр отверстия (диаметр поставленной заклепки);
- $p$  – шаг заклепочного шва, или расстояние между заклепками в направлении, перпендикулярном действующему усилию  $F$ ;
- $e$  – расстояние от заклепок до кромки листа;
- $e_1$  – расстояние между рядами в многорядных швах.

Кроме обозначенных параметров, в расчетах заклепочных швов на прочность фигурируют толщина деталей  $\delta$  и толщина накладок  $\delta_1$ .

Для наиболее часто встречающихся швов выработаны нормы, определяющие значения параметров  $d_0$ ,  $p$ ,  $\delta_1$ ,  $e$ ,  $e_1$  в зависимости от толщины  $\delta$  соединяемых деталей. Расчет на прочность таких швов носит проверочный характер.





Параметры заклепочного шва

### Расчет заклепочных соединений на прочность

Рассмотрим симметричное по отношению к центру соединения (ц.с.) действие нагрузки. С целью упрощения расчета силами трения между деталями пренебрегают ввиду сложности их учета. Также принимают, что нагрузка, действующая на соединение, распределяется между всеми заклепками шва в равных долях. Расчетная сила, приходящаяся на одну заклепку,

$$F_p = F / n ,$$

где  $n$  – число заклепок (для стыковых швов – число заклепок по одну сторону стыка). Неточность, вносимая в расчет принятием этих допущений, компенсируется назначением соответственно более низких значений допускаемых напряжений.

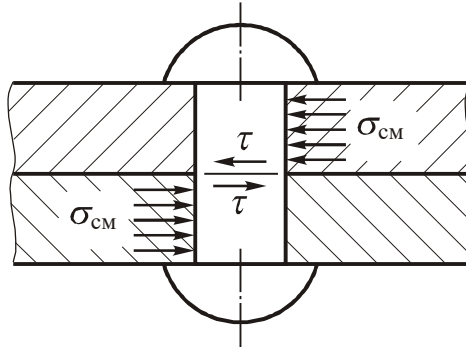
Разрушение заклепочных швов происходит по следующим основным причинам: ввиду среза заклепок; из-за смятия заклепок и соединяемых деталей; в силу среза детали у кромки по сечениям 1 – 1 и 2 – 2; из-за разрыва детали по ослабленному отверстиями сечению  $m - m$ . В соответствии с перечисленными причинами рассматривают четыре расчетных случая.

**Случай 1. Расчет заклепок на срез.** Срез заклепки вызывается касательными напряжениями и происходит в поперечных сечениях, лежащих в плоскости стыка деталей. В зависимости от числа  $i$  плоскостей среза площадь среза  $A_{ср} = i\pi d_0^2 / 4$ . Условие прочности запишется в виде

$$\tau_c = \frac{4F_p}{i\pi d_0^2} \leq [\tau_c] .$$

При переходе к полной силе, действующей на соединение, имеем

$$\tau_c = \frac{4F}{in\pi d_0^2} \leq [\tau_c].$$



Напряжения смятия и среза

**Случай 2. Расчет заклепок и отверстий деталей на смятие.** Смятие вызывают напряжения  $\sigma_{см}$ , действующие в контакте цилиндрических поверхностей заклепки и отверстия. Данный расчет производят по условной площади смятия, равной проекции на осевую плоскость наиболее нагруженной части стержня заклепки:  $A_{см} = d_0 \delta_{min}$ , где  $\delta_{min}$  – меньшая из толщин соединяемых деталей.

Условие прочности на смятие:

$$\sigma_{см} = \frac{F_p}{d_0 \delta_{min}} \leq [\sigma_{см}], \quad \text{или} \quad \sigma_{см} = \frac{F}{nd_0 \delta_{min}} \leq [\sigma_{см}].$$

**Случай 3. Расчет детали на разрыв по ослабленному отверстиями сечению.** Таковым является сечение  $m - m$  (см. рисунок выше). Площадь сечения разрыва обозначим через  $A_{нетто}$  в отличие от площади  $A_{брутто}$  сечения цельной детали. Запишем условие прочности детали на разрыв:

$$\sigma_p = \frac{N}{A_{нетто}} \leq [\sigma_p],$$

где  $N$  – продольное усилие в сечении. Очевидно,

$$N = F_p n_1 = F \frac{n_1}{n}.$$

Здесь  $n$  – общее число заклепок (по одну сторону стыка);  $n_1$  – число заклепок, попадающих в область между кромкой данной детали и рассматриваемым сечением (рядом) включительно.

$$A_{нетто} = (b - zd_0)\delta,$$

где  $z$  – число заклепок в рассматриваемом ряду.

Подстановка этих выражений в условие прочности дает:

$$\sigma_p = \frac{Fn_1}{n(b - zd_0)\delta} \leq [\sigma_p].$$

Детали в стыковых швах рассчитывают аналогично. При расчете накладок вместо  $\delta$  берется их суммарная толщина  $2\delta_1$ .

В качестве примера с помощью последней формулы определим расчетные напряжения в сечениях  $m_1 - m_1$ ,  $m_2 - m_2$  и  $m_3 - m_3$  нахлесточного шва (см. рисунок выше):

$$\sigma_p^{m_1-m_1} = \frac{F \cdot 10}{10(b - 3d_0)\delta} = \frac{F}{(b - 3d_0)\delta} \quad (n = 10; n_1 = 10; z = 3);$$

$$\sigma_p^{m_2-m_2} = \frac{F \cdot 7}{10(b - 4d_0)\delta} = \frac{0,7F}{(b - 4d_0)\delta} \quad (n = 10; n_1 = 7; z = 4);$$

$$\sigma_p^{m_3-m_3} = \frac{F \cdot 3}{10(b - 3d_0)\delta} = \frac{0,3F}{(b - 3d_0)\delta} \quad (n = 10; n_1 = 3; z = 3).$$

**Понятие о коэффициенте прочности заклепочного шва.** Постановка заклепок ослабляет соединяемые детали. Коэффициентом  $\varphi$  прочности шва называют отношение напряжений, возникающих в цельной детали, к напряжениям в наиболее слабом сечении шва. Очевидно для цельной детали

$$\sigma_p^{\text{брутто}} = \frac{F}{b\delta},$$

поэтому имеем

$$\varphi = \frac{n(b - zd_0)}{n_1 b},$$

где параметры  $z$  и  $n_1$  берут для наиболее напряженного сечения (ряда).

В случае если ряды шва достаточно длинные и имеют регулярное строение с одинаковым шагом  $p$ , наиболее слабым будет крайнее сечение  $m_1 - m_1$ , для которого  $n_1 = n$ . Легко видеть, что в этом случае

$$\varphi = \frac{p - d_0}{p}.$$

**Выбор допускаемых напряжений.** Допускаемые напряжения при расчете заклепочных соединений выбирают по таблице:

**Допускаемые напряжения в силовых заклепочных соединениях, МПа**

Вид напряжений	Обработка отверстия	Ст0 и Ст2	Ст3
Срез, $[\tau_c]$	Сверление	140	140
	Продавливание	100	100
Смятие, $[\sigma_{cm}]$	Сверление	280	320
	Продавливание	240	280