

# Клеевые, паяные и заклепочные соединения

# 1. Паяные соединения

Пайкой называется способ соединения элементов конструкций путем их нагрева ниже температуры плавления материалов деталей соединения, смачивания их расплавленным припоем, затекания припоя в зазор между деталям соединения и последующей его кристаллизации при охлаждении. Паяные соединения подобны сварным; отличие пайки от сварки — отсутствие расплавления или высокотемпературного нагрева соединяемых деталей, так как припои имеют более низкую температуру плавления, чем материалы соединяемых деталей.

Связь в паяном шве основана на растворении металла деталей в расплавленном припое; взаимной диффузии элементов припоя и металла соединяемых деталей; бездиффузионной атомной связи.

Наряду с использованием пайки как основного вида соединений в радиоэлектронной и электротехнической аппаратуре паяные соединения получили распространение и в изделиях машиностроения. Пайку применяют при изготовлении камер сгорания жидкостных реактивных двигателей, лопаток турбин, топливных и масляных трубопроводов, деталей ядерных реакторов и других конструкций из тугоплавких металлов (молибдена, ниобия, тантала, вольфрама) плохо поддающихся сварке.

## **Достоинства** паяных соединений:

- возможность соединять детали не только из однородных, но и из разнородных материалов, например, стали со сплавами цветных металлов, металлы с графитом, ферритом, фарфором и др.;
- повышенная технологичность, так как возможно осуществлять пайку в скрытых или малодоступных местах конструкции, изготавливать сложные узлы за один прием, паять не по контуру, а одновременно по всей поверхности соединения;
- подбирая соответствующие припои, можно выбрать температуру пайки так, чтобы при нагреве под пайку у предварительно термообработанных материалов сохранялись механические свойства в изделии (в готовом соединении) или чтобы нагрев под пайку одновременно обеспечивал и термическую обработку деталей соединения;
- возможность распайки соединения.

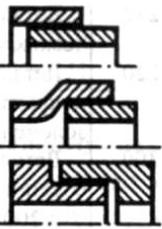
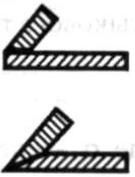
## **Недостатки:**

- сравнительно низкая прочность паяного соединения на сдвиг и очень низкая прочность на отрыв;
- высокая трудоемкость изготовления изделий методами высокотемпературной пайки.

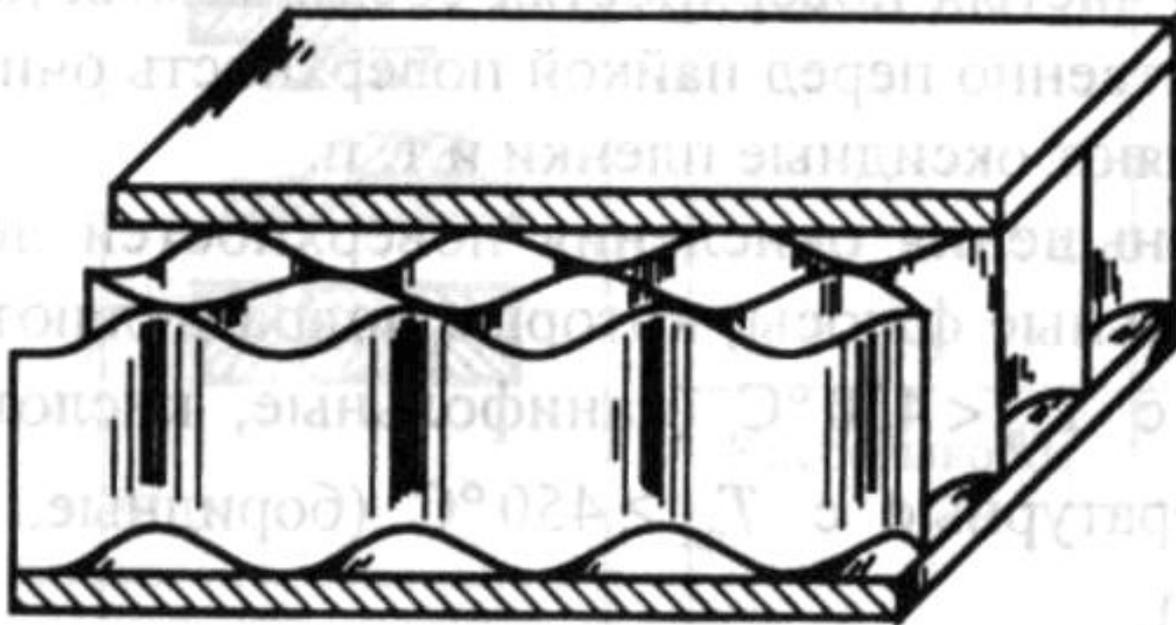
# Характеристики наиболее часто применяемых в машиностроении способов пайки

Способы пайки	Характеристики способов
Паяльником	Универсальный ручной способ низкотемпературной пайки
Газовой горелкой	Универсальный ручной способ высокотемпературной пайки
Индукционная	Для изделий небольших размеров; быстрый нагрев; возможность механизации и автоматизации процесса
В печах с флюсом	Минимальная деформация изделий; равномерный нагрев; возможность регулирования и механизации
В печах и контейнерах с инертным газом; в вакуумных печах	Универсальный способ высокотемпературной пайки; минимальная деформация изделий; отсутствие окисления и флюса на изделиях после пайки; возможность объективного контроля режима пайки
Сканирующим электронным лучом	Короткий цикл; возможность локализации нагрева, механизации и автоматизации процесса
Погружением в расплавленный припой или флюс	Высокая производительность; быстрый нагрев и точное регулирование температуры

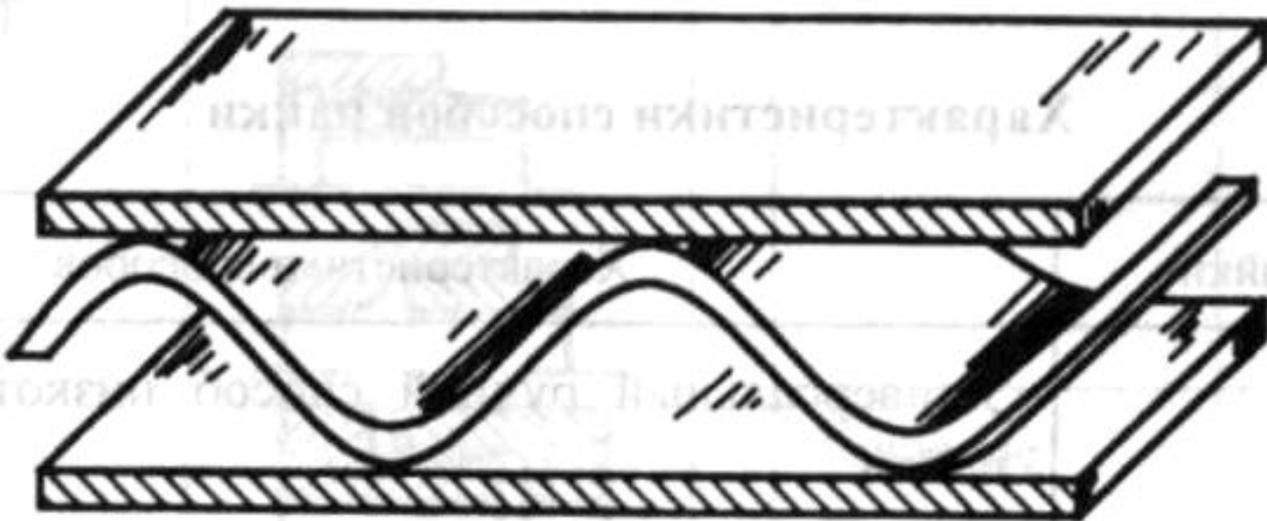
# Основные типы паяных соединений

Соединение	Сечение	Соединение	Сечение
Нахлесточное		Стыковое	
Телескопическое		Косостыковое	
Соприкасающиеся		Тавровое	
		Угловое	

Паяные соединения предпочтительно выполнять нахлесточными; площадь перекрытия (площадь пайки) следует назначать так, чтобы прочность паяного соединения была равна прочности целой детали. Стыковые соединения, имеющие ограниченную паяную площадь, менее прочны, чем нахлесточные. При действии значительных нагрузок применять стыковые соединения не рекомендуется; в случае необходимости при повышенных нагрузках вместо стыковых соединений можно рекомендовать косостыковые, у которых больше площадь пайки и выше несущая способность. Соприкасающиеся соединения допустимы для изделий, паяные швы которых работают на сжатие и при малых нагрузках.



*a*



*б*

В последнее время находят применение сотовые паяные конструкции; в обшивке самолетов листы из малопрочных алюминиевых сплавов заменяют паяными высокопрочными и жесткими панелями из тонких стальных листов с сотовым (рис. а) или гофровым (рис. б) промежуточным наполнителем.

При любом типе паяного соединения между деталями необходим зазор порядка 0,01...0,4 мм, чтобы туда мог затекать расплавленный припой. Зазоры зависят от вида припоя и материалов деталей соединения и в значительной степени определяют прочность соединений. Их уменьшение до некоторого предела увеличивает прочность паяных соединений.

Следует отметить, что прочность паяного шва выше (иногда существенно) прочности припоя в связи с растворением в слое припоя материала деталей и в связи с тем, что слой припоя находится в стесненном напряженном состоянии между соединяемыми деталями.

Перед пайкой требуется более точная по сравнению со сваркой механическая обработка и сборка деталей соединения.

**Припои** делятся на высокотемпературные с  $T_{пл} > 450$  °С и низкотемпературные с  $T_{пл} < 450$  °С. Основными компонентами высокотемпературных припоев являются медь (Сu), никель (Ni) и серебро (Ag), а низкотемпературных — олово (Sn) и свинец (Pb).

## Основные припои и рекомендации по их применению

Марка припоя	Система припоя	Температура плавления, °С		Примеры изделий
		начальная	конечная	
<b>Высокотемпературные припои</b>				
ВПр1	Cu-Ni	1080	1120	Трубопроводы и другие изделия из коррозионно-стойкой стали
ВПр2	Cu-Mn-Ni	960	970	
ВПр4	Cu-Ni-Mn	940	980	Стальные изделия неотвеченного назначения
Л63	Cu-Zn	900	905	
ПСр25ф	Cu-Ag-P	645	725	Детали из меди и ее сплавов
ПСр25	Cu-Zn-Ag	740	775	Трубопроводы
ПСр40	Ag-Cu-Zn	590	610	Детали из стали и меди
ПСрМин63	Ag-Cu-In	750	760	Детали из сплавов титана
<b>Низкотемпературные припои</b>				
О2, О3	Sn	232	232	Детали для любых климатических условий без покрытий
Пос90	Sn-Pb	183	220	Детали с гальваническими покрытиями (серебрение, золочение)
ПСр2, 5	Ag-Sn-Pb	295	300	Детали и электромонтажные соединения, работающие при $T \leq 200$ °С

## 2. Клеевые соединения

Клеевыми называют неразъемные соединения с помощью клея, образующего между деталями соединения тонкую прослойку. Клеевые соединения получили широкое распространение благодаря созданию конструкционных высокопрочных клеев на основе синтетических полимеров, позволяющих скреплять между собой детали с высокой прочностью. Иногда склеивание — единственный способ соединения деталей из разнородных материалов.

**Процесс склеивания обычно состоит из следующих операций:**

- превращение клеящего вещества в состояние, пригодное для нанесения на поверхности склеиваемых материалов (расплавление, растворение, смешение компонентов и др.);
- подготовка поверхностей склеивания (придание шероховатости, обезжиривание и т. п.);
- нанесение клеящего вещества и сборка соединения;
- превращение клеящего вещества в клеевой слой, соединяющий материалы при соответствующих температурах, давлении и времени выдержки.

## Достоинства клеевых соединений:

- снижаются требования к точности сопрягаемых деталей, быстро и экономично осуществляется сборка;
- клеевой слой является хорошим тепло-, звуко- и электроизолятором;
- не ослабляются соединяемые детали;
- клеи способны скреплять детали, материалы которых существенно отличаются по физико-химическим свойствам;
- клеящие материалы заполняют микрозазоры, что позволяет получать герметичные соединения;
- пленка клея улучшает распределение нагрузки и препятствует возникновению контактной коррозии.

## Недостатки клеевых соединений:

- малую прочность при отрывающих нагрузках с неравномерным ее распределением (отрыв, когда один или оба соединяемых элемента имеют малую жесткость, или отрыв с изгибом);
- нестабильность физико-механических свойств во времени (старение с течением времени, приводящее к снижению прочности клеевых соединений);
- ухудшение механических характеристик при пониженных и повышенных температурах, при воздействии биосреды, химических реагентов и других факторов;
- необходимость тщательной подготовки поверхностей под склеивание.

# Механические характеристики клеевых соединений и области применения клеев, наиболее часто используемых в промышленности

Клей	Предел прочности, МПа		Назначение
	при отрыве	при сдвиге	
Неорганический	10	—	Склеивание металлов, работающих при температурах до 500 °С
Поливинилацетальфеновый	20	14	Склеивание стекла и дуралюмина для рабочих температур 40 °С
Эпоксидный (ЭД-5, Э-40 и др.)	45	20	Склеивание металлов и неметаллов для рабочих температур ±60 °С
Полиуретановый (ПУ-2 и др.)	34,5	16	То же
Фенолформальдегидный (БФ-2, ВС-10 и др.)	8	3	»
Синтетический	20–40	10–20	Склеивание металлов, древесины, стекла, резины, кожи и др.
Полиакриловый (ВК-31, ВК-41 и др.)	23	30–40	То же

Хорошее соединение пайкой можно получить лишь при исключительно чистых поверхностях соединяемых деталей. Поэтому непосредственно перед пайкой поверхность очищают от грязи и масел, удаляют оксидные пленки и т. п. Для уменьшения окисления поверхностей деталей применяют специальные флюсы, которые подразделяют на низкотемпературные с  $T_{пл} < 450\text{ }^{\circ}\text{C}$  (канифольные, кислотные и др.) высокотемпературные с  $T_{пл} > 450\text{ }^{\circ}\text{C}$  (боридные, боридно-углекислые).

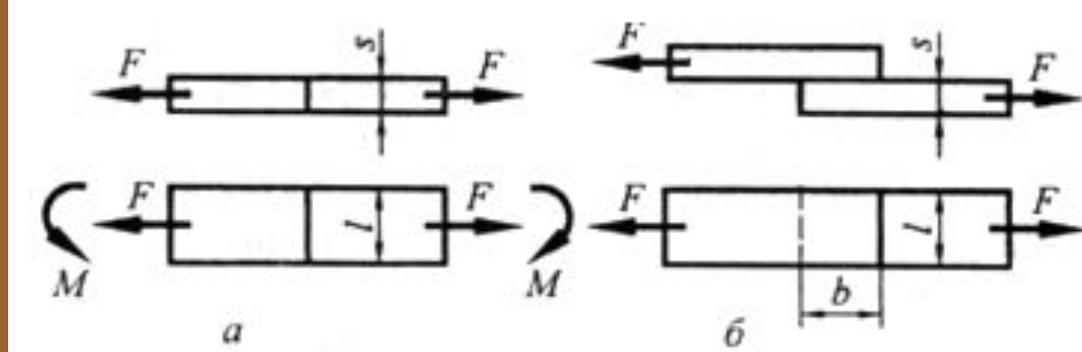
**Расчет паяных стыковых и нахлесточных соединении на прочность аналогичен расчету сварных соединений. Стыковые паяные соединения рассчитывают на прочность как целые детали по номинальному сечению соединяемых деталей, так как сечения соединяемых деталей и сечение пайки идентичны. Естественно, что допускаемые напряжения определяются прочностью примененного припоя.**

Материал паяемых элементов	Припой	Способы нагрева	Допускаемые напряжения для соединений, МПа	
			стыковых $[\sigma]$	нахлесточных $[\tau]$
Латунь	Олово	Паяльником	40–50	30–40
Медь	ПОС 40		60–70	40–50
	ПОС 18		80–90	25–40
	ПСр 45	В печи	300–320	240–300
Низкоуглеродистая сталь	Олово	Паяльником	80	40
	ПОС 40		100	50
	ПОС 18		105	60
	ПСр 45	В печи	220–240	170–180
	ВПр		300–400	250–300
	М1		350–400	180–200

При действии на соединение центральной растягивающей силы  $F$  и изгибающего момента  $M$  условие прочности стыкового паяного соединения находят по формуле

$$\sigma = \frac{F}{l_s} + \frac{M}{W} \leq [\sigma],$$

где  $\sigma$  — действующие напряжения;  $W$  — момент сопротивления сечения деталей соединения в месте пайки;  $[\sigma]$  — допускаемые напряжения растяжения для паяных соединений



При расчете нахлесточных соединений надо учитывать лишь то, что площадь расчетного сечения равна площади контакта (пайки) деталей соединения, например, при действии центральной сдвигающей силы нахлесточные соединения (рис. б) рассчитывают на срез

$$\tau = \frac{F}{lb} \leq [\tau]$$

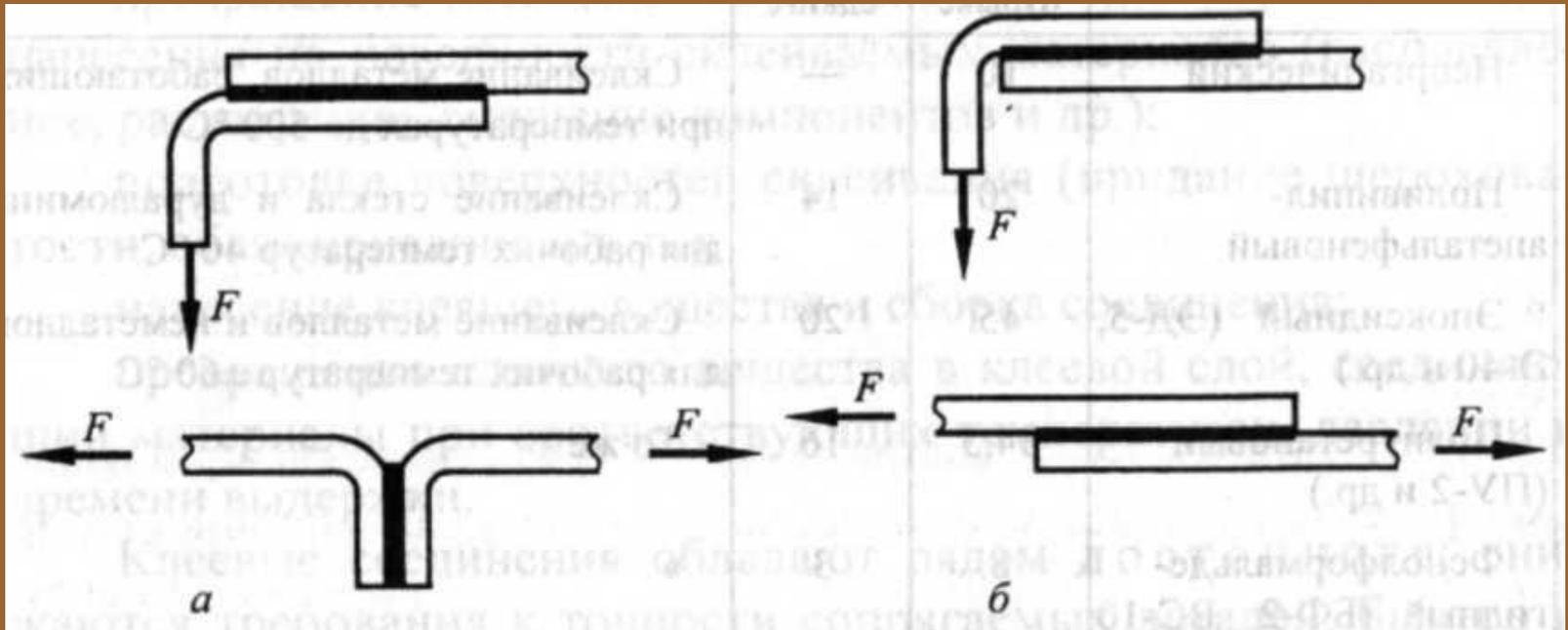
где  $[\tau]$  — допускаемые напряжения на срез для паяных соединений;  $l$  — ширина пайки;  $b$  — длина нахлестки

При других случаях нагружения расчет нахлесточных паяных соединений проводят по формулам, аналогичным для сварных соединений.

С увеличением площади контакта (пайки) несущая способность соединений возрастает. В нахлесточных соединениях увеличение ширины пайки имеет больший эффект, чем увеличение длины нахлестки

## Виды соединений.

Клеевые соединения конструктивно подобны сварным и паяным: основные типы соединений те же. При проектировании клеевых соединений следует иметь в виду, что клеевые швы обладают достаточно большой прочностью при сдвиге и равномерном отрыве, а при неравномерном «отдире» (отрыв с изгибом), как показано на рис. , а, прочность соединений существенно снижается. Поэтому везде, где возможно, клеевое соединение должно быть сконструировано работающим на сдвиг (рис. б) или сжатие.



Соединения типа вал-ступица выполняют телескопическими. Детали соединения изготавливают с гарантированным зазором порядка 5... 15 мкм (при больших зазорах затруднено центрирование деталей соединения). Поверхности деталей перед нанесением клея тщательно очищают от загрязнений и обезжиривают. Клей наносят на обе соединяемые поверхности (распылением, кистью, валиком). Сборку соединения осуществляют с нагревом охватывающей детали до +150 °С. Такой метод обеспечивает зазор между деталями при сборке, возможность заполнения этого зазора клеем (до остывания охватывающей детали) и высокую прочность сцепления между деталями после отверждения клея, значительно превышающую прочность сцепления в соединениях с натягом.

## Расчет клеевых соединений.

Расчет клеевых соединений на прочность ведется по формулам, аналогичным для расчета паяных соединений. Например, для соединений типа вал-ступица при одновременном действии на соединение вращающего момента  $T$  и осевой силы  $F_a$  расчет ведут по равнодействующей сдвигающей силе.

$$F_{\Sigma} = \sqrt{\left(\frac{2T}{d}\right)^2 + F_a^2}$$

и по условию прочности клеевого соединения на сдвиг (срез)

$$F_{\Sigma} \leq \pi d l [\tau],$$

откуда потребная длина соединения

$$l = \frac{\sqrt{\left(\frac{2T}{d}\right)^2 + F_a^2}}{\pi d [\tau]},$$

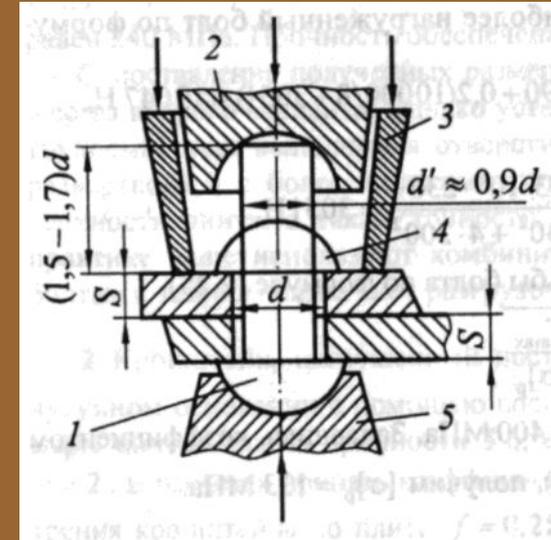
где  $T$  — вращающий момент;  $F_a$  — осевая сила;  $d$  — диаметр вала (диаметр сопряжения);  $[\tau]$  — допускаемые напряжения среза (сдвига).

При определении допускаемых напряжений  $[\tau]$  принимают коэффициент запаса  $s$  по отношению к пределам прочности при сдвиге равным  $s = 2,5 \dots 3$  при статической нагрузке;  $s = 4 \dots 5$  при переменных нагрузках, а при наличии в спектре нагрузок существенных перегрузок (при вибрациях, ударных нагрузках и т. п.) запас принимают еще больше.

Для получения особо прочных соединений, испытывающих произвольную нагрузку, включая неравномерный отрыв, вибрационную и ударную нагрузки, применяют комбинированные соединения: клеесварные, клеезаклепочные, клеebolтовые и клеевые соединения с натягом

### 3. Заклепочные соединения

Заклепка представляет собой стержень круглого сечения с головками на концах, одну из которых, называемую закладной 1, выполняют на заготовке заранее, а вторую, называемую замыкающей 4, формируют при клепке. Заклепочные соединения образуют постановкой заклепок в совмещенные отверстия соединяемых элементов и расклепкой с осаживанием стержня. При этом за счет поперечной упругопластической деформации стержня происходит заполнение начального зазора между стержнем и стенками отверстия, в некоторых случаях с образованием натяга.



1 — закладная головка; 2 — обжимка; 3 — прижим; 4 — формируемая головка; 5 — поддержка

Заклепочные соединения разделяют следующим образом:

- а) силовые (иначе называемые прочными соединениями), используемые преимущественно в металлических конструкциях машин, в строительных сооружениях;
- б) силовые плотные, используемые в котлах и трубах, работающих под давлением .

Достоинства заклепочных соединений:

- стабильность;
- контролируемость качества.

Недостатки:

- повышенный расход металла и высокая стоимость;
- неудобные конструктивные формы в связи с необходимостью наложения одного листа на другой или применения специальных накладок.

Область практического применения заклепочных соединений ограничивается следующими случаями:

- 1)соединения, в которых нагрев при сварке недопустим из-за опасности отпуска термообработанных деталей или коробления окончательно обработанных точных деталей;
- 2)соединения несвариваемых материалов;
- 3)соединения в авиа- и судостроении (в современном

Клепку стальными заклепками диаметром до 8...10 мм, а также заклепками из латуни, меди и легких сплавов всех диаметров производят холодным способом, а остальных заклепок — горячим способом.

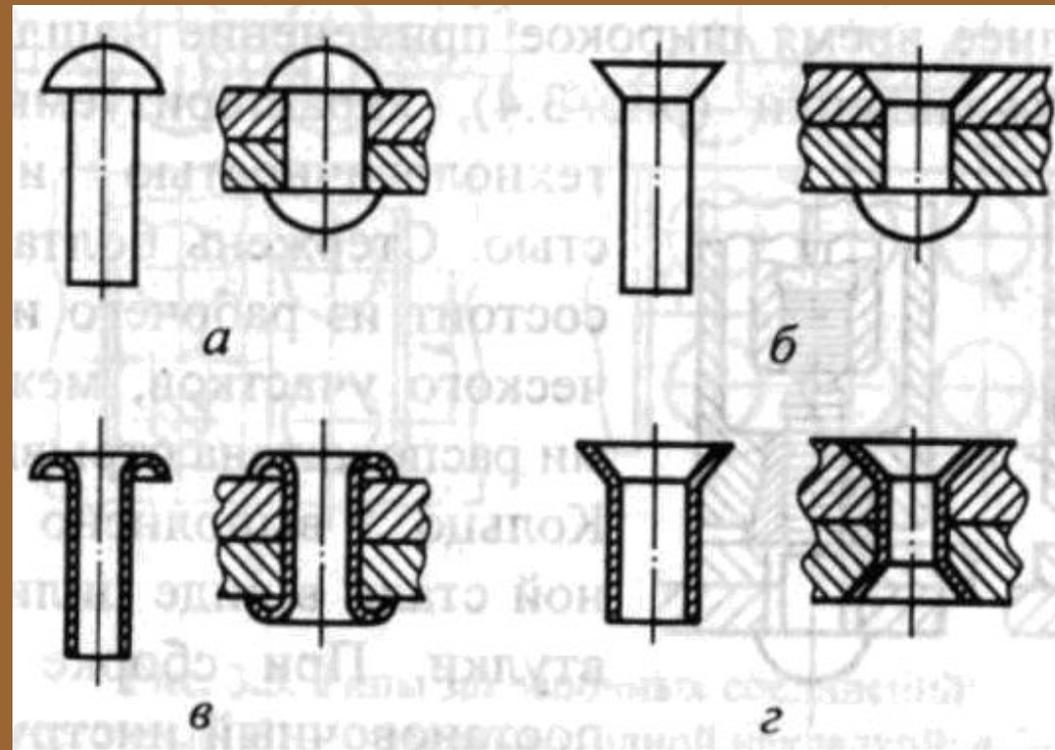
Материал заклепок должен быть достаточно пластичным для обеспечения возможности формирования головок и однородным с материалом соединяемых деталей во избежание электрохимической коррозии.

Стальные заклепки обычно изготавливают из сталей Ст2, Ст3, 15, 09Г2 и др. Из легких сплавов для заклепок применяют сплавы В65, АД1 (на основе алюминия) и ОТ4, ВТ16 и др. (на основе титана).

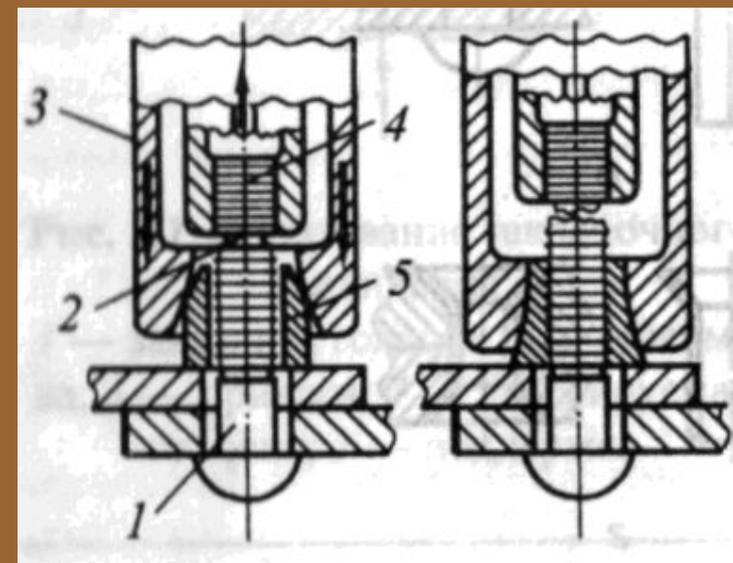
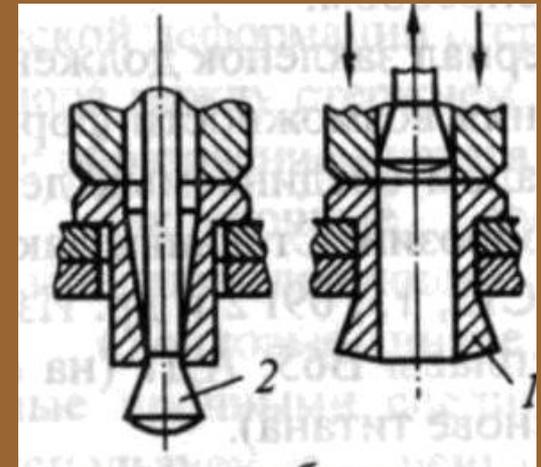
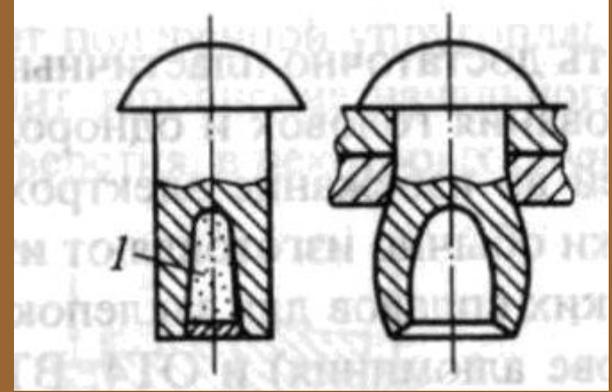
Конструкции некоторых видов стандартных заклепок и варианты соединения деталей с помощью этих заклепок показаны на рис.

Заклепки со стальным стержнем (рис., а, б) применяют в основном при выполнении прочных и прочноплотных соединений.

Пустотелые заклепки (рис. в, г) — при соединении тонких листов и неметаллических деталей, не допускающих больших нагрузок.



Используют также специальные заклепки. На рис, а в качестве примера показана взрывная заклепка, применяемая в случае невозможности образования замыкающей головки обычным способом, например в труднодоступных местах. Взрыв вызывается нагревом заклепки или ударом. Если нет доступа к замыкающей головке, используют заклепки с односторонним доступом. Замыкающая головка 1 в таких заклепках образуется при протягивании стержня 2 с наконечником через коническое отверстие заклепки. В последнее время широкое применение нашли так называемые болты-заклепки. При сборке соединения постановочный инструмент захватывает стержень за технологический хвостовик 4, а фильера 3, перемещаясь в противоположном постановочному инструменту направлении, сжимает пакет. При этом одновременно происходит обжим и формирование замыкающей головки. После достижения требуемой степени сжатия пакета и полного обжатия кольца технологический хвостовик обрывается.

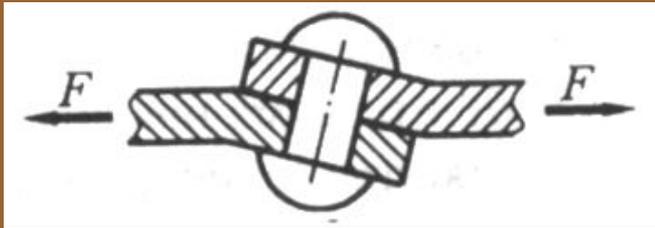


# Типы заклепочных соединений.

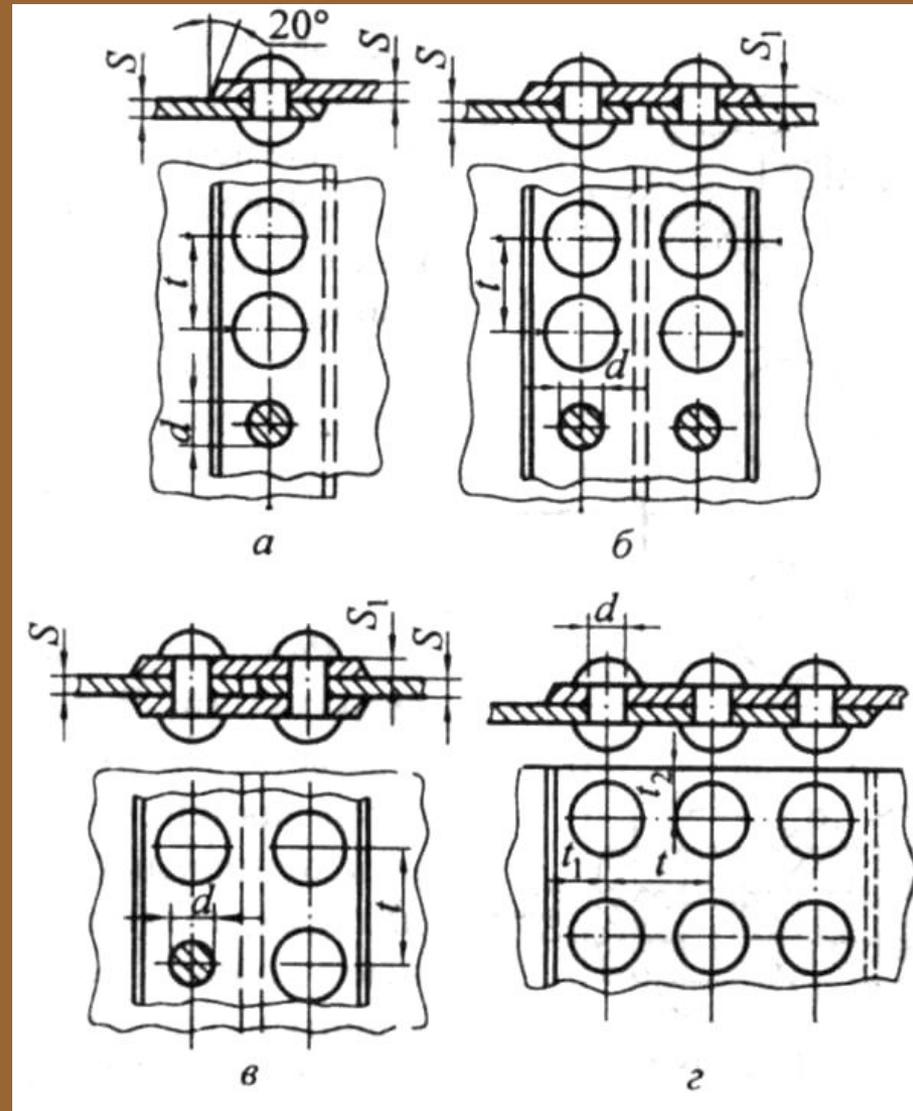
По конструкции заклепочные соединения подразделяют на соединения внахлестку (рис. а), с одной накладкой (рис. б) и с двумя накладками (рис. в). Первые два соединения являются односрезными, последнее — двухсрезным.

По числу рядов заклепок соединения бывают одно- и многорядные (рис. г).

Недостатком односрезных соединений с одной накладкой является деформация зоны соединения под действием изгибающего момента.



Двухсрезные соединения с двумя накладками лишены этого недостатка, однако более металлоемки.



Диаметр  $d$  заклепок в односрезных силовых соединениях выбирают равным  $(1,8...2)S$ , в двухсрезных  $(1,2... 1,8)S$ , где  $S$  — толщина соединяемых элементов. В авиастроении принимают

$$d = 2\sqrt{S}$$

Минимальный шаг размещения заклепок определяется удобством клепки и прочностью соединяемых листов, максимальный — условиями плотного соприкосновения листов и зависит от жесткости соединяемых элементов. Обычно шаг  $t$  в однорядном односрезном соединении принимают  $3d$ , в двухсрезном —  $3,5d$ , в двухрядных соединениях  $(4...5)d$ . Расстояние  $l$  от оси заклепки до края листа принимают равным  $(1,5...2)d$

# Расчет заклепочных соединений.

В соответствии с обычными условиями работы заклепочных соединений основными нагрузками для них являются продольные силы, стремящиеся сдвинуть соединяемые детали друг относительно друга. При нагружении заклепочного соединения продольными силами нагрузка передается силами трения. В случае, если заклепка установлена в отверстие без зазора или с натягом, то тело заклепки также принимает участие в работе. Условие равновесия внешних и внутренних сил может быть записано в виде

$$F_1 = \sigma_p A f + \tau' A i$$

где  $F_1$  — внешняя нагрузка, отнесенная к одной заклепке;  $\sigma_p$  и  $\tau'$  — соответственно напряжения растяжения и среза в поперечном сечении заклепки;  $A$  — площадь сечения заклепки;  $f$  — коэффициент трения между соединяемыми деталями;  $i$  — число срезов.

В связи с неопределенностью напряжения  $\sigma_p$ , зависящего от особенностей техпроцесса клепки, на практике в расчетах силу трения не учитывают, используя более простой расчет по условным напряжениям среза

$$\tau_{ср} = \frac{F_1}{A i} \leq [\tau]_{ср},$$

где  $[\tau]_{ср}$  — условное допускаемое напряжение заклепки на срез. Из этого условия, задавшись  $[\tau]_{ср}$ , можно определить  $F_1$ .

При центрально действующей нагрузке  $F$  необходимое число заклепок в нахлесточном соединении  $n = F/F_1$ .

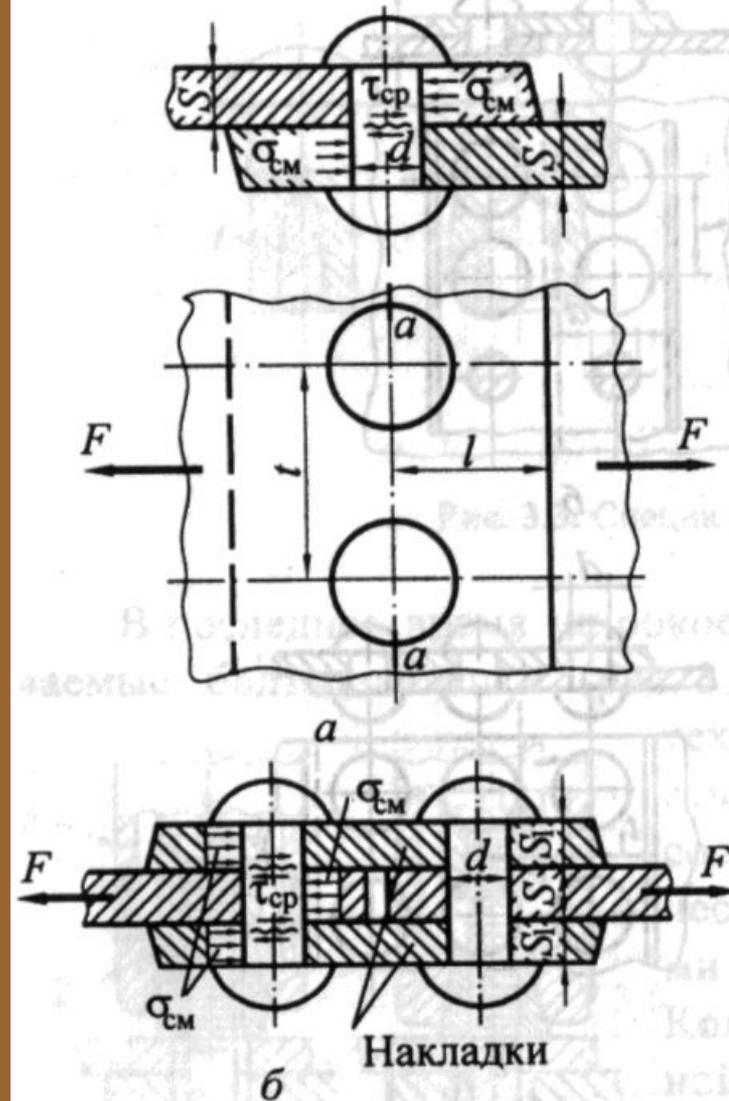
В стыковых соединениях с использованием накладки число заклепок увеличивается вдвое.

При действии на соединение момента в плоскости стыка определение сил, действующих на отдельные заклепки, производится, как при расчете групповых резьбовых соединений.

Заклепки в односрезном или двухсрезном силовом соединении проверяют на смятие

$$\sigma_{\text{см}} = \frac{F_1}{Sd} \leq [\sigma]_{\text{см}},$$

где  $S$  — толщина соединяемой детали;  $d$  — диаметр заклепки;  $[\sigma]_{\text{см}}$  — допускаемое напряжение смятия, принимаемое обычно для материала заклепки.



Соединяемые элементы проверяют на прочность в сечениях, ослабленных заклепками (см. сечение а-а на рис.),

$$\sigma_p = \frac{F}{A_{\text{нетто}}} = \frac{F}{S(b - n_1 d)} \leq [\sigma]_p,$$

где  $A_{\text{нетто}}$  — площадь детали в опасном сечении с учетом ослабления ее отверстиями;

$S$  и  $b$  — толщина и ширина листа;

$n_1$  — число заклепок в одном ряду;

$[\sigma]_p$  — допускаемое напряжение при растяжении материала деталей, при продавливании отверстий и при холодной клепке допускаемые напряжения понижают на 20...30 %

