



*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования*

«Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана»
(МГТУ им. Н. Э. Баумана)



Проектирование элементов автомобиля из композиционных материалов

Лекция 11

«Технология выполнения соединений конструкций из композиционных материалов»

Составил доцент кафедры «Колесные машины», к.т.н.

Карташов Александр Борисович



Введение



Выбор рационального способа соединения деталей из ПКМ оказывает существенное влияние на местную и общую прочность конструкции в целом.

Вид соединения зависит от эксплуатационных нагрузок и других требований:

- технологичности;
- герметичности;
- разъемности соединений;
- теплостойкости и т.д.

При конструировании соединений надо учитывать не только перечисленные выше требования, но и массовые показатели соединений и их экономичность.



1. Классификация соединений



Соединения элементов конструкций с использованием ПКМ подразделяются на:

- разъемные;*
- неразъемные.*

По способу соединения выделяют:

- *механические;*
- *сплошные соединения.*



Классификация соединений



Сплошные соединения подразделяют на:

- клеевые (адгезионные);*
- приформовочные;*
- сварные;*
- комбинированные (клеемеханические, клееприформовочные).*

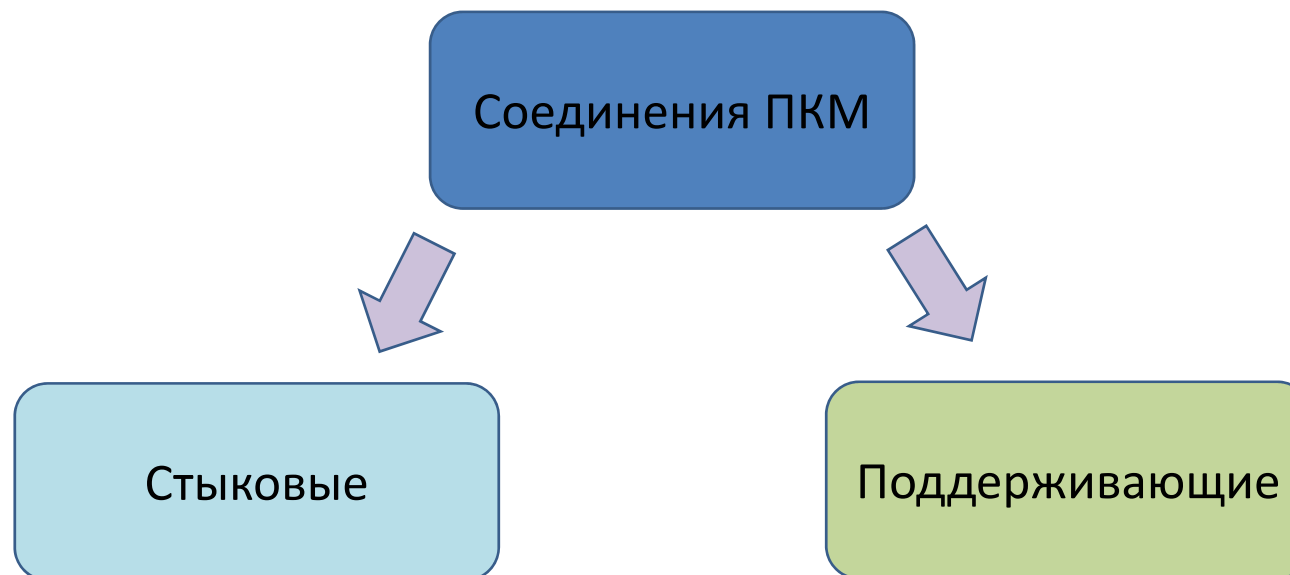


Классификация соединений



Требования, предъявляемые к конструкции соединительного узла, характер нагрузок, действующих на соединение, зависят от назначения и условий эксплуатации изделия.

В соответствии с характером передачи нагрузок в автомобиле соединения подразделяют на стыковочные и поддерживающие.





Классификация соединений



К стыковочным относится группа механических и комбинированных металлопластиковых соединений, которые являются наиболее распространенными конструкциями.

В этих конструкциях все нагрузки, приходящиеся на стык, воспринимаются металлическими элементами и передаются на корпус изделия через соединительный элемент, представляющий собой оболочку из композиционного материала.

Другую группу соединений составляют конструкции, основная особенность которых заключается в том, что нагрузка на стыке передается непосредственно адгезионными прослойками.

Примером поддерживающих соединений служат соединения обшивки с сотовым наполнителем в трехслойных панелях кузова автомобиля



Классификация соединений



В настоящее время наиболее широко распространены соединения армированных пластиков и конструкций на их основе следующих типов:

- резьбовые,
- клеевые,
- заклепочные,
- шпилечно-болтовые соединения.

Несмотря на то, что клеевые и резьбовые соединения обладают рядом преимуществ, их нельзя применять для передачи сосредоточенных нагрузок в соединениях элементов, имеющих большую толщину.

В таких случаях широко используют заклепочные и шпилечно-болтовые соединения. Прочность и выносливость шпилечно-болтовых соединений в конструкциях из КМ в основном определяются уровнем концентрации напряжений около отверстий. Начальные напряжения в соединениях такого типа обусловлены применением шпилек, штифтов и болтов, устанавливаемых с натягом или затяжкой, что создает в зоне отверстий напряженное состояние, которое значительно изменяет прочностные характеристики механических соединений при действии внешних нагрузок.



Классификация соединений



Армирование материалов оболочки в зоне стыка металлической фольгой или высокопрочными пленками позволяет повысить механические характеристики материала композиции и снизить массу конструкции.

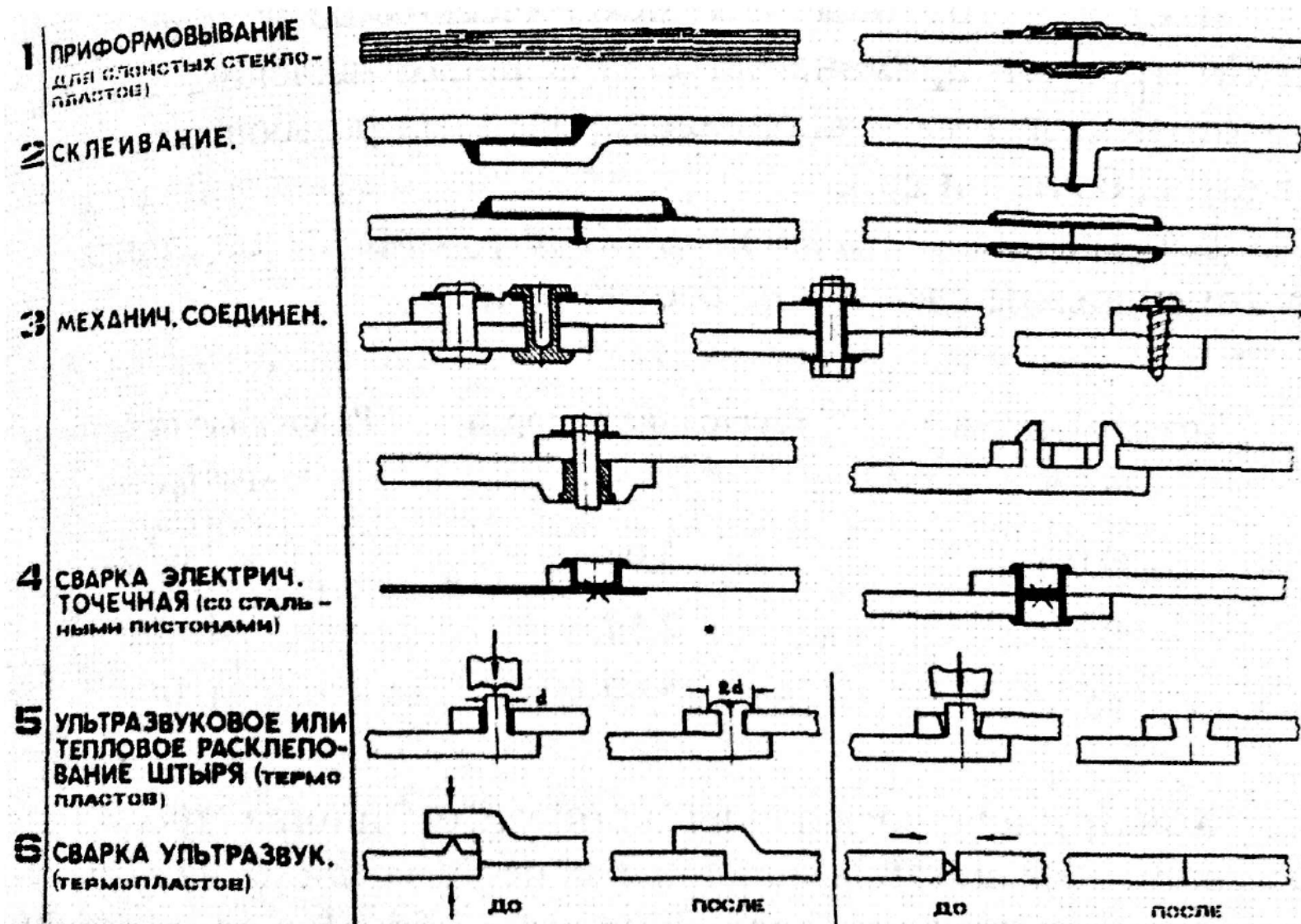
Условно все виды соединений можно подразделить на три класса:

- 1) сплошные (клеевые, формовочные, сварные);
- 2) механические (резьбовые, клепаные, шпилечно-болтовые, само-заклинивающиеся, сшивные и игольчатые);
- 3) комбинированные (клееклепаные, клеесшивные, клееигольчатые, клееболтовые, клеерезьбовые и другие сочетания механических и клеевых соединений).

Рациональное проектирование соединительных узлов с целью минимизации массы конструкции предопределяет прежде всего анализ факторов, влияющих на их несущую способность.



Наиболее часто встречающиеся соединения изделий из ПКМ





Анализ факторов



Конструктивные факторы

В зависимости от этих факторов выбирают класс соединения, геометрические параметры, материалы крепежных элементов и вид элемента, подкрепляющие конструкцию в зоне стыка, и т.д. Класс соединения (сплошные, механические, комбинированные) наиболее значительно влияет на прочность и надежность изделий и во многом определяет технологию их изготовления.

Следует отметить, что для существующих в настоящее время классов соединений отсутствует единая методика выбора рационального соединения конструкций из КМ. Считая, что данная проблема требует специального решения, проанализируем основные параметры, которые необходимо определить при проектировании различных соединений.



Конструктивные факторы



Наиболее важными конструктивными факторами сплошных соединений являются длина адгезионной прослойки $G_{пр}$, толщины соединяемых элементов t и δ и их изменение вдоль шва, а также жесткости адгезионной прослойки $G_{пр}$ и соединяемых элементов E_t и E_δ .

Основными факторами механических соединений следует считать количество крепежных элементов $n_{к.э}$, диаметр силовых точек $d_{с.м}$, шаг между силовыми точками t , расстояние от силовых точек до кромки c , а также механические характеристики материала силовых точек и соединяемых материалов.

Большое влияние на прочность оказывает тип соединения:

- односрезное,
- двухсрезное,
- рядное или шахматное расположение силовых точек,
- одно- или многослойное соединение.



Конструктивные факторы



В резьбовых соединениях большое значение имеют тип резьбы и ее протяженность, наличие усиливающих элементов и т.п. Главное при проектировании комбинированных соединений – обеспечение совместных деформаций клеевой прослойки и механических элементов.

Таким образом, основными конструктивными факторами, влияющими на прочность соединения, являются отношения модулей сдвига клеевого и механического соединений $G_{кл}/G_{м.с.}$. При этом жесткость механического соединения определяется прочностью и жесткостью силовых точек и основного материала силовых оболочек, а клеевого — типом (маркой) клеевой прослойки и соотношением параметров $l_{пр}, t, \delta, G_{кл}, E_t, E_{\delta}$.



Технологические факторы



Эти факторы определяют структурные параметры композиционного материала, его физикомеханические характеристики, остаточные напряжения, возникающие в процессе изготовления соединений.

Следует особо отметить такие факторы, как натяг заклепок и болтов, усилие затяжки болтов и шпилек, точность и взаимозаменяемость элементов, усадочные напряжения в композиционных материалах, качество образования отверстий и резьб.



Эксплуатационные факторы



Эти факторы непосредственно зависят от уровня и спектра внешних нагрузок, времени и температуры эксплуатации, требуемого ресурса работы изделия, состояния среды (например, влияния влаги на клеевую прослойку).



Общий анализ факторов

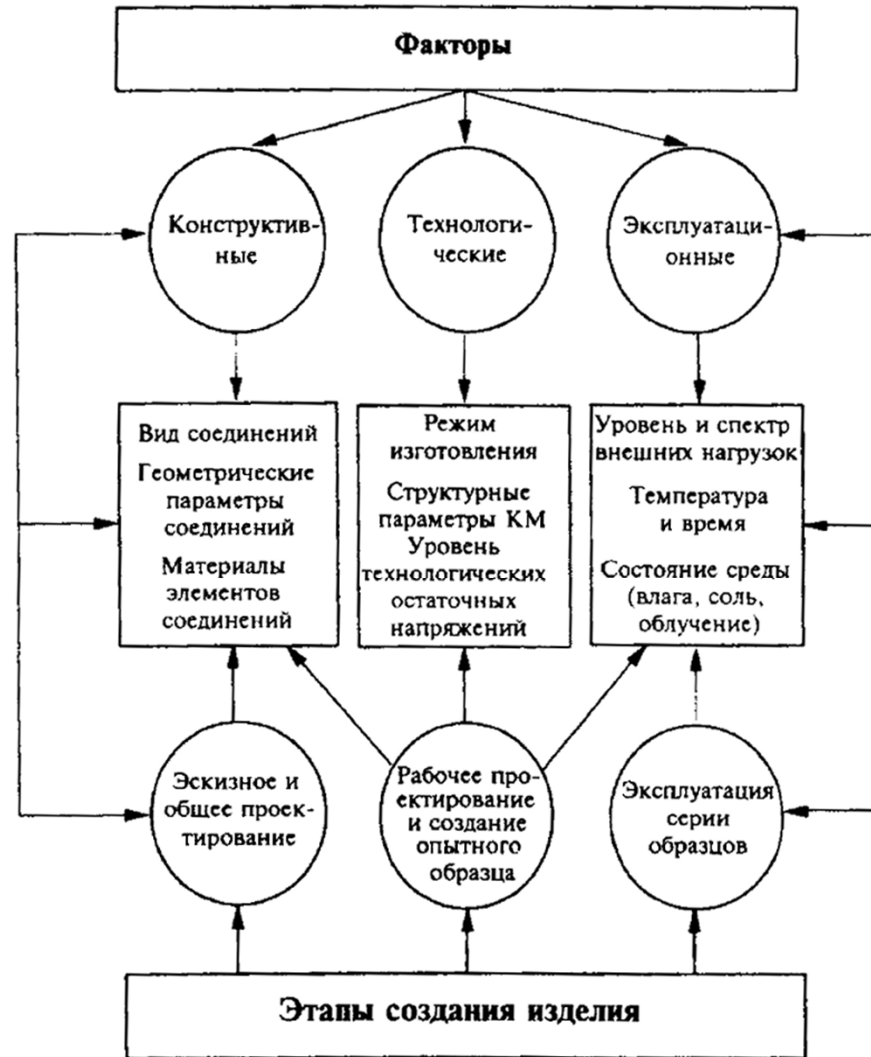


Общий анализ факторов, влияющих на прочность соединений, показывает, что на стадии проектирования часть из них известна, а другая часть возникает в процессе реализации и отработки спроектированной конструкции.

Из рисунка далее ясно, что часть этих факторов подлежит определению уже на стадии эскизного проектирования, другая – на стадии отработки технологии и эксплуатации опытных конструкций.



Факторы, определяющие несущую способность соединения



Факторы, определяющие несущую способность соединений



2. Сплошные соединения



2.1. Клеевые соединения

Клеевым называют неразъемное соединение элементов конструкций с помощью клея, образующего между ними тонкую прослойку. Основная функция клея – скрепление и фиксация между собой элементов конструкции. Склеивание упрощает и ускоряет процессы сборки и создает возможности для применения в новых областях техники.

Клеевые соединения в последние годы широко распространены во многих отраслях машиностроения благодаря созданию конструкционных клеев на основе синтетических полимеров, позволяющих соединять с достаточно высокой прочностью детали из одинаковых и разнородных материалов.

Иногда склеивание представляет собой единственный способ соединения разнородных материалов в ответственных конструкциях.



2.1. Клеевые соединения. Достоинства



Клеевые соединения обладают рядом достоинств:

- 1) способны соединять самые разнообразные материалы, которые могут существенно отличаться по физико-механическим свойствам и толщине, причем можно соединять элементы конструкции небольшой толщины;
- 2) не ослабляют соединяемые детали;
- 3) не подвержены коррозии и могут выполняться герметичными;
- 4) позволяют создавать изделия сложной формы, с плавными обводами, без выступающих частей;
- 5) могут превосходить по прочности другие соединения при работе на срез, а также по сравнительно полному использованию площади сопряжения соединяемых деталей (при этом возможно снижение массы конструкции);



Клеевые соединения. Достоинства



- 6) позволяют экономично и быстро осуществлять сборку; являются хорошими тепло-, звуко-, электроизоляторами;
- 7) позволяют соединять чувствительные к нагреву материалы, деформируемые или разрушаемые при сварке и пайке;
- 8) после однократной нагрузки адгезионные соединения имеют меньшие остаточные деформации, чем механические;
- 9) адгезионные соединения являются меньшими концентраторами напряжений, чем механические;
- 10) стоимость адгезионных соединений ниже, чем механических.



Клеевые соединения. Недостатки



К недостаткам клеевых соединений относят:

- 1) малое сопротивление отдирающим нагрузкам, ползучести;
- 2) нестабильность физико-механических и электрических свойств во времени (старение);
- 3) ухудшение механических характеристик при низких и высоких температурах;
- 4) при воздействии биосферы, химических реагентов и других факторов;
- 5) пожароопасность и токсичность некоторых клеев, недостаточная жизнеспособность, длительное время отверждения;



Клеевые соединения. Недостатки



- 6) потребность технологической оснастки, необходимость тщательной подготовки поверхности под оклеивание.
- 7) сопротивление текучести при повышении температуры невелико;
- 8) они плохо работают на отдир;
- 9) затруднен неразрушающий контроль;
- 10) во многих случаях (при больших габаритах деталей) требуется дополнительное оборудование;
- 11) необходима большая точность взаимного расположения деталей.



Клеевые соединения



Область применения и объемы клеевых соединений непрерывно расширяются.

Использование склеивания в машине-, приборо- и автомобилестроении, в авиации и ракетно-космической технике позволяет повышать производительность труда и уровень надежности изделий, экономить дорогостоящие материалы. Современные самолеты имеют до 500 м², а аэробусы до 1500 м² силовых клеевых соединений.

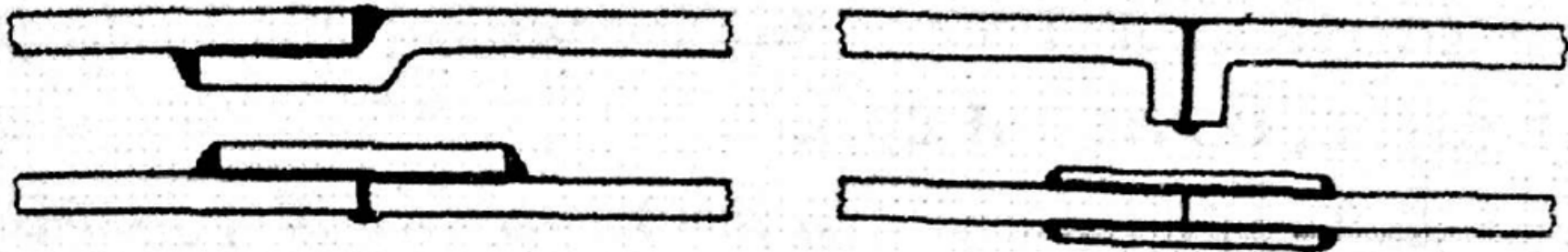
Конструктивно клеевые соединения выполняют внахлестку, встык с двумя накладками и со скосом кромок и обычно используют для толщин приклеиваемого материала не более 2....5 мм.



Конструктивные клеевые соединения



Соединения внахлестку, встык с двумя накладками и с одной накладной, соединения, работающие на отдир.



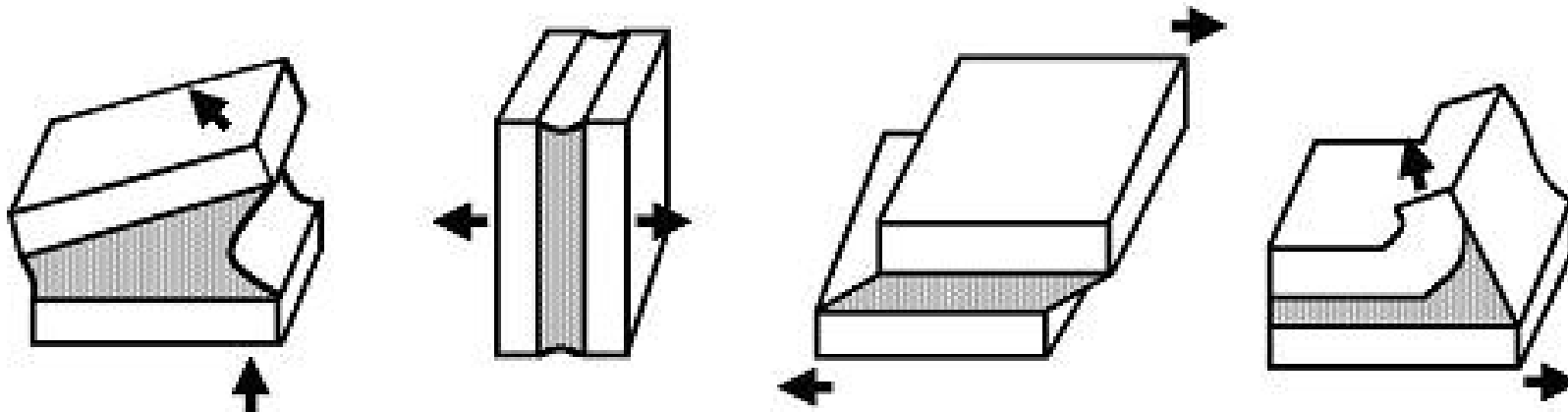


Клеевые соединения



Для клеевых (адгезионных) соединения основными типами нагружения являются:

- изгиб;
- отрыв;
- сдвиг;
- отдир.





Технологические требования, предъявляемые к клеям



К клеям предъявляются жесткие технологические требования:

- клей должен иметь высокие когезионные и адгезионные характеристики, так как ими в основном определяется прочность соединения;
- время, в течение которого в условиях эксплуатации клей сохраняет свои свойства, должно соответствовать требуемому временному ресурсу изделия;
- по отношению к материалам конструкции клей не должен быть коррозионно-активным;
- клей в процессе отверждения должен иметь минимальную усадку, в противном случае он не дает сплошного слоя;
- количество летучих составляющих, содержащихся в клее (растворителей), должно быть минимальным;
- клей и его компоненты должны обладать грибо-, водо-, атмосферостойкостью и не быть токсичными;
- стоимость клея должна быть приемлема для производства изделий автомобильной промышленности.



Клеевые соединения



Ни один из применяемых в настоящее время составов клея не удовлетворяет в полной мере всем приведенным требованиям.



Клеевые добавки



В целях ускорения отверждения клеевых композиций в них вводят катализаторы и отвердители, которые играют важную роль в формировании соединения.

Как недостаток, так и избыток отвердителя ведут к снижению прочности соединения.

Для придания клеевому шву невысокой жесткости в него добавляют пластификаторы.



Клеевые добавки



В целях повышения прочности клеевого шва, уменьшения усадки клея, увеличения его термостойкости, электропроводности, придания клеевому соединению специальных свойств в клеевую композицию часто добавляют наполнители в виде минеральных и металлических порошков, различных волокон.



Клеевые соединения в автомобилестроении



В настоящее время в автомобилестроении применяют огромное количество клеев различных типов. Для склеивания конструкционных неметаллических материалов и их сочетаний наиболее широко применяют полимерные клеи.

По клеевой основе их разделяют на следующие типы:

- ❑ термореактивные (основа – эпоксидные, полиэфирные, фенолформальдегидные, мочевиноформальдегидные, полиуретановые, кремнийорганические и другие смолы);
- ❑ термопластичные (основа – полиэтилен, поливинилхлорид, полиэстеры, полиакрилаты, полисульфаты и другие смолы);
- ❑ эластомеры (основа – натуральный каучук, синтетические и регенерированные каучуки).



Несущая способность клеевых соединений



Несущая способность, а в некоторых случаях и деформации клееных конструкций зависят от механических свойств клеевых швов и напряженно-деформированного состояния клеевых соединений.

Последнее определяется деформационными свойствами клеевого шва и склеиваемых материалов, геометрией соединения и способом нагружения.



Несущая способность клеевых соединений



Напряженно-деформированное состояние клеевых соединений, как правило, неоднородно, а их разрушение начинается в зоне, где напряжения достигают критических для данного соединения значений.

На практике в подавляющем большинстве случаев приходится иметь дело с образцами и соединениями в конструкциях, характеризующимися существенной неоднородностью напряженного состояния.

Положение осложняется еще и тем, что вследствие релаксационных процессов напряжения в клеевом шве со временем не остаются постоянными, а могут существенно перераспределяться.



Прочность клеевых соединений



При оценке прочности клеевых соединений при кратковременном нагружении наиболее широкое распространение получили три показателя:

- средняя прочность;
- максимальное напряжение;
- энергия разрушения.



Показатель «Средняя прочность»



Показатель прочности характеризуется напряжением, которое представляет собой отношение разрушающего усилия P_p к площади склеивания S :

$$\tau_{ср} = P_p / S.$$

Показатель средней прочности часто применяется в практике контрольных испытаний качества склеивания, а также в исследовательских работах. Его широкое использование объясняется простотой расчетной формулы и тем, что при его определении используются легкодоступные для измерения результаты опыта. К недостаткам следует отнести то, что добиться равномерного распределения напряжений на площади склеивания довольно сложно. На показатель средней прочности конструкции при сдвиге сильно влияют геометрия и деформационные свойства всех ее частей особенно клеевого шва.



Показатель «Максимальное напряжение»



Поскольку большинство способов испытаний клеевых соединений не обеспечивают равномерности нагружения всех адгезионных связей соединения, образцы начинают разрушаться там, где проявляется максимальное напряжение.

По физическому смыслу показатель максимального напряжения ближе к прочности адгезионных связей пары «адгезив – субстрат», чем средняя прочность.

Единственными методами оценки максимальных напряжений оказываются расчетные.



Показатель «Максимальное напряжение» (2)



Например, при расчете цилиндрических соединений на сдвиг по теории Давиденкова-Фридмана можно использовать соотношение:

$$\tau_{cp} \leq \frac{\tau_{max}}{\sqrt{\left(\frac{K_{\sigma}}{2}\right)^2 + K_{\tau}^2}},$$

где τ_{cp} и τ_{max} – среднее и максимальное напряжение; K_{σ} , K_{τ} – коэффициенты концентрации нормальных и касательных напряжений соответственно.

В инженерных расчетах значение τ_{max} может быть приравнено к допускаемому напряжению при сдвиге или срезе. При кручении (на сдвиг) $K_{\sigma}=0$; $K_{\tau}=1$ и $\tau_{cp} < \tau_{max}$.



Показатель «Энергия разрушения»



Энергетический показатель применяется при неравномерном отрыве.

Следует различать расчет энергии разрушения:

- 1) при отслаивании (расслаивании) мягких материалов;
- 2) при неравномерном отрыве массивных и жестких склеиваемых материалов.

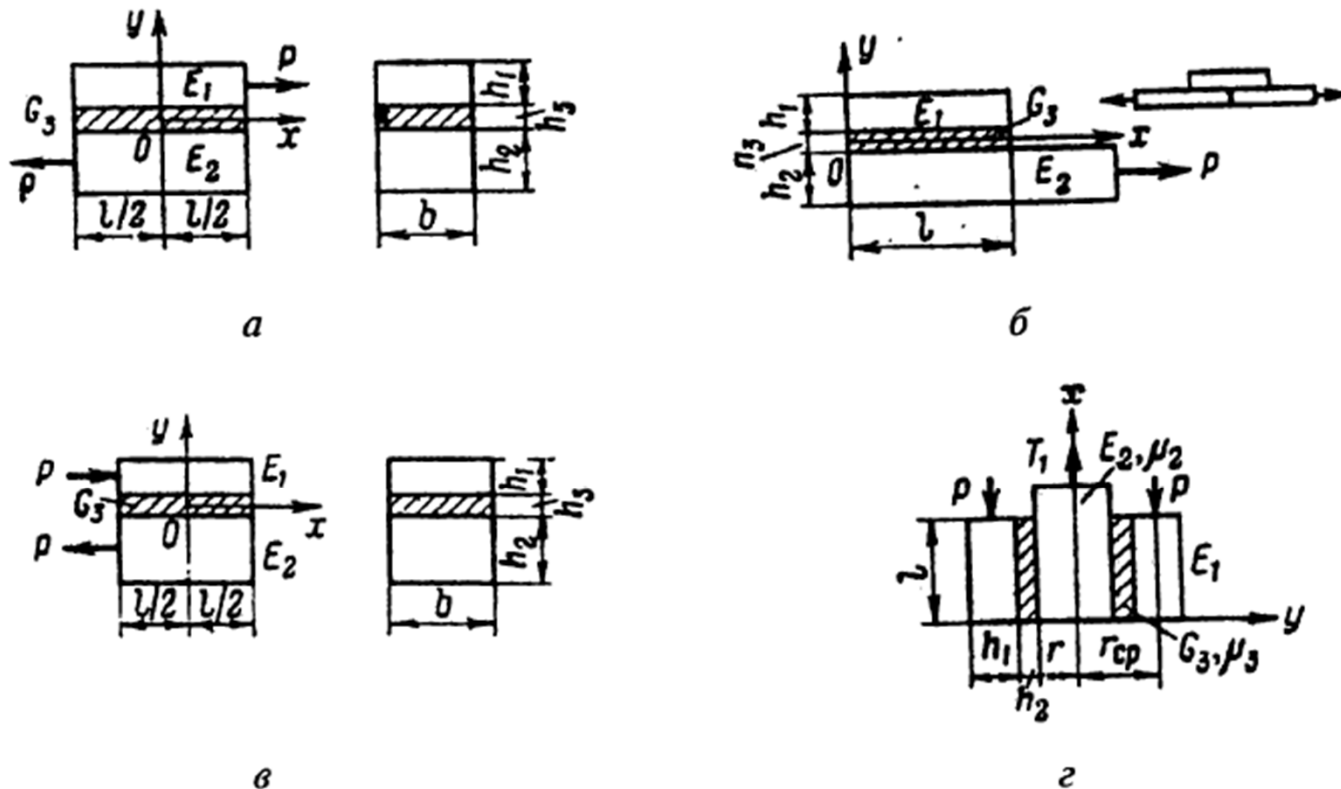
Во втором случае приходится учитывать затраты энергии на деформирование склеиваемых материалов.



Примеры расчета различных моделей клеевых соединений



Методы расчета (см. рисунок) основаны на предположении, что клеевой слой работает только на сдвиг



Модели для расчета клеевых соединений:

a – сдвиг при растяжении; *б* – сдвиг соединения с одной накладкой;
в – сдвиг при сжатии; *г* – сдвиг цилиндрических соединений

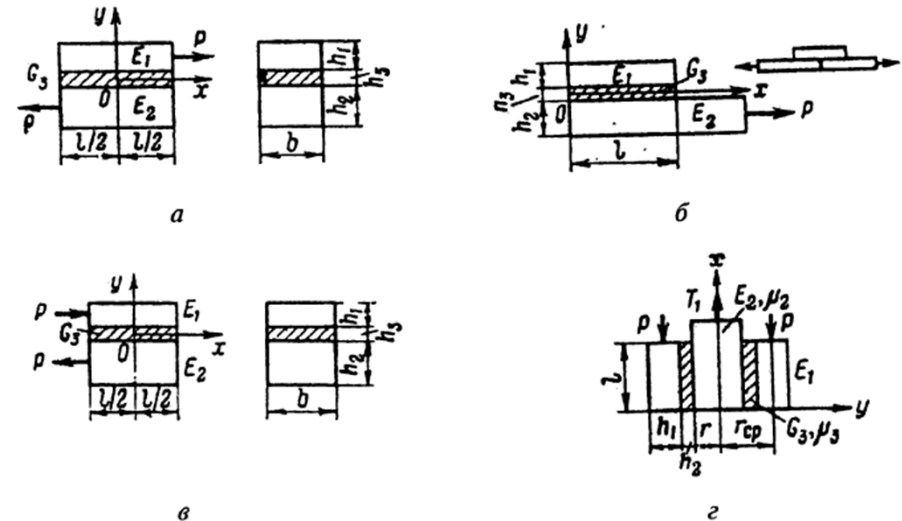


Примеры расчета различных моделей клеевых соединений



Очевидно, что это предположение справедливо только тогда, когда толщина клеевого шва мала по сравнению с толщиной склеиваемых материалов.

В этих одномерных моделях обкладки (склеиваемые материалы) рассматриваются как стержни, в которых существуют лишь нормальные растягивающие и сжимающие напряжения и сечения которых остаются плоскими, а в слое клея возникают постоянные по толщине касательные напряжения.



Модели для расчета клеевых соединений:

a – сдвиг при растяжении; *б* – сдвиг соединения с одной накладкой; *в* – сдвиг при сжатии; *г* – сдвиг цилиндрических соединений

Но из-за одномерности задачи не удовлетворяется условие равенства нулю касательных напряжений на краях клеевого слоя.



Примеры расчета различных моделей клеевых соединений



Другим предположением для не очень тонких клеевых прослоек является предположение об анизотропии клеевого шва, основанное на том, что модуль упругости клея E_{x-x} в направлении плоскости сдвига стремится к нулю.

Это предположение справедливо в случае изгиба трехслойной пластины, когда нормальные напряжения убывают к нейтральной линии

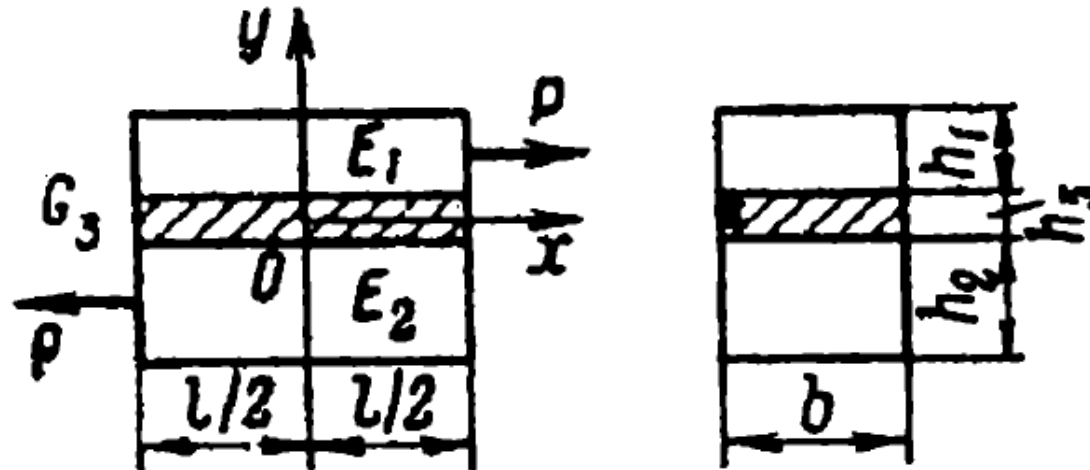
Предположение позволило решать двумерные задачи, рассматривая обкладки как балки, сечения которых поворачиваются, оставаясь плоскими, а в клеевом шве кроме касательных напряжений учитывать и нормальные (отрывающие), например σ_{zy} .



Примеры расчета различных моделей клеевых соединений. Пример 1



Сдвиг при растяжении (соединение
внахлестку). Здесь и далее индексы 1 относятся к толщине h_1 ,
модулю упругости E_1 , соединяемой детали 1 ; 2 – к толщине h_2 ,
модулю упругости E_2 , соединяемой детали 2 ; а 3 – к толщине
клеевой прослойки h_3 , модулю сдвига G_3 .



Сдвиг при растяжении



Примеры расчета различных моделей клеевых соединений. Пример 1



Рассмотрим случай, когда $E_1 \neq E_2$ и $h_1 \neq h_2$. Тогда касательное напряжение в клеевом слое определяется по формуле

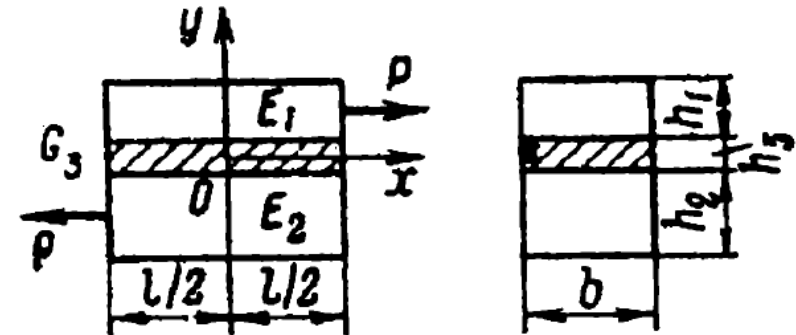
$$\tau_{3x} = \frac{P}{b} \beta \alpha \left[\frac{2\beta - 1}{2\beta} \frac{\operatorname{sh} \alpha x}{\operatorname{ch} v} + \frac{1}{2\beta} \frac{\operatorname{ch} \alpha x}{\operatorname{sh} v} \right],$$

где коэффициенты

$$\alpha = \sqrt{\frac{G_3}{E_2} \frac{1}{h_2 h_3} \left(1 + \frac{E_2 h_2}{E_1 h_1} \right)};$$

$$\beta = \frac{E_2 h_2 / E_1 h_1}{1 + (E_2 h_2 / E_1 h_1)};$$

$$v = \frac{\alpha l}{2}.$$



Сдвиг при растяжении



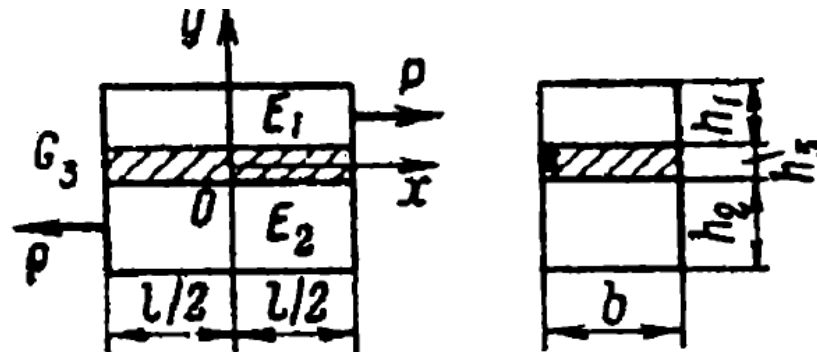
Примеры расчета различных моделей клеевых соединений. Пример 1



При $x = \pm \frac{l}{2}$ максимальное касательное напряжение в клеевом шве

$$\tau_{3\max} = \tau_{\text{ср}} l \beta \alpha \left(\frac{2\beta - 1}{2\beta} \operatorname{th} \nu + \frac{1}{2\beta} \operatorname{cth} \nu \right),$$

где $\tau_{\text{ср}}$ – среднее касательное напряжение в клеевом соединении, $\tau_{\text{ср}} = \frac{P}{bl}$.



Сдвиг при растяжении



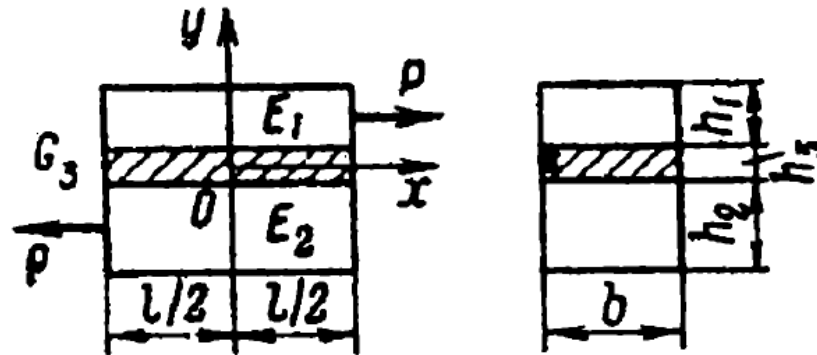
Примеры расчета различных моделей клеевых соединений. Пример 1



Рассмотрим теперь случай, когда $E_1 = E_2$ и $h_1 = h_2$. Напряжение в клеевом слое

$$\tau_{3x} = \frac{P}{2b} \alpha \frac{\operatorname{ch} \alpha x}{\operatorname{sh} \alpha l},$$

где $\alpha = \sqrt{\frac{2G_3}{E_1 h_1 h_3}}$, а $\tau_{3\max} = \tau_{\text{ср}} \nu \frac{1}{\operatorname{th} \nu}$.



Сдвиг при растяжении



Примеры расчета различных моделей клеевых соединений. Пример 2



Пример 2 Сдвиг, соединение с одной накладкой.
Напряжение в клеевом шве

$$\tau_{3x} = \frac{P}{b} \frac{\beta}{\beta + \gamma} \alpha \frac{\operatorname{sh} \alpha x}{\operatorname{ch} \alpha l},$$

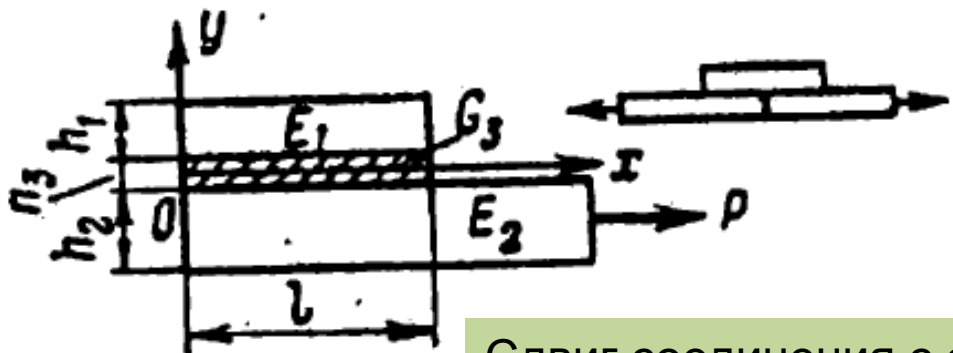
коэффициенты

$$\beta = h_1 / h_2; \quad \gamma = E_2 / E_1;$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{h_1 E_1 + h_2 E_2}{h_1 E_1 h_2 E_2} \frac{G_3}{h_3}}.$$

Максимальное напряжение в клеевом шве при $x = l$

$$\tau_{3\max} = \frac{P}{b} \frac{\beta}{\beta + \gamma} \alpha \operatorname{th} \alpha l.$$



Сдвиг соединения с одной накладкой



Примеры расчета различных моделей клеевых соединений. Пример 3



Пример 3 КЛЕЕВОМ ШВЕ

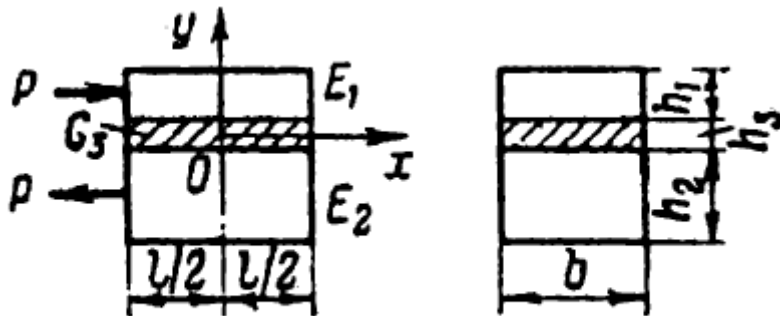
Сдвиг при сжатии. Напряжение в

$$\tau_{3x} = \frac{P}{b} \alpha \frac{\operatorname{ch} \alpha (l/2 - x)}{\operatorname{sh} 2v},$$

где $v = \alpha l / 2$; $\alpha = \sqrt{\frac{G_3}{E_3} \frac{1}{h_2 h_3} \left(1 + \frac{E_2 h_2}{E_1 h_1} \right)}$.

Максимальное касательное напряжение при $x = -l/2$

$$\tau_{3\max} = \tau_{\text{cp}} \alpha l \operatorname{th} \alpha l.$$



Сдвиг при сжатии



Примеры расчета различных моделей клеевых соединений. Пример 4



Пример 4

Сдвиг цилиндрических соединений.

Касательное напряжение в клеевом шве

$$\tau_{3x} = -\tau_{\text{ср}} \frac{\lambda_1 l \operatorname{ch} \lambda_1 x}{\operatorname{sh} \beta \lambda_1 l},$$

а нормальное напряжение

$$\sigma_{3x} = \tau_{\text{ср}} K_{\sigma} \frac{\operatorname{sh} \lambda_1 x}{\operatorname{sh} \lambda_1 l},$$

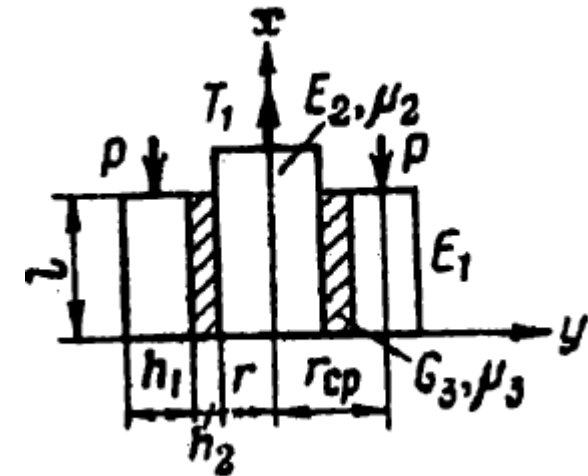
где коэффициенты

$$\lambda_1 = \sqrt{\frac{G_3}{h_3}} \eta, \quad \eta = \frac{1}{E_2} + \frac{r}{r_{\text{ср}}} \xi;$$

$$\xi = \frac{1}{h_1 E_1} \left(1 - \frac{\mu_1^2 r}{h_1 E_1 \beta} \right);$$

$$K_{\sigma} = \frac{\mu_1 r l}{r_{\text{ср}} h_1 E_1 \beta};$$

$$\beta = \frac{1}{E_1} + \frac{r}{h_1 E_1} + \frac{h_3 (1 - \mu_3)}{r E_3}.$$



Сдвиг
цилиндрических
соединений

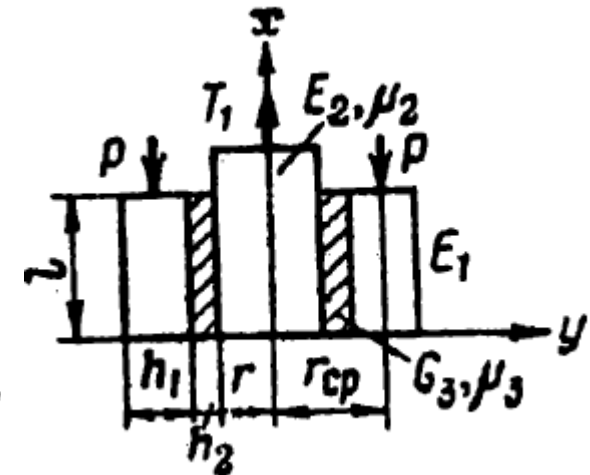


Примеры расчета различных моделей клеевых соединений. Пример 4



Среднее значение напряжения

$$\tau_{\text{ср}} = \frac{T_1}{2\pi r l}$$



Максимальные значения напряжений при $x = l$

$$\tau_{3\text{max}} = \tau_{\text{ср}} \lambda_1 l c t h \lambda_1 l;$$

$$\sigma_{3\text{max}} = \tau_{\text{ср}} K_{\sigma}.$$

Сдвиг
цилиндрических
соединений



2.2. Формовочные соединения (приформовывание)



По механизму соединения и виду вспомогательных материалов этот вид соединения близок к склеиванию.

Сущность приформовки заключается в нанесении на место стыка накладок из стеклоткани или другого материала, который пропитан связующим, с последующим его отверждением и образованием связи между деталями и накладками.

Технологии процессов приформовки и контактного формования аналогичны. Отличие состоит лишь в том, что соединяются детали, прошедшие стадию отверждения.

Приформовку широко применяют при производстве крупногабаритных изделий из стеклопластиков и других КМ.



Формовочные соединения (приформовывание)



Кроме того, приформовку используют для крепления различной металлической арматуры, оборудования, механизмов и т.д.

При нанесении приформовочной массы методами напыления или намотки достигается более высокий уровень механизации работ. Как правило, этот вид соединения применяют для толщин соединяемых материалов до 50 мм и выше.

При этом рациональной является ступенчатая конструкция соединений, имеющая следующие преимущества: снижение внутренних напряжений в 5 — 10 раз и более, и минимальный межслоевой сдвиг в КМ

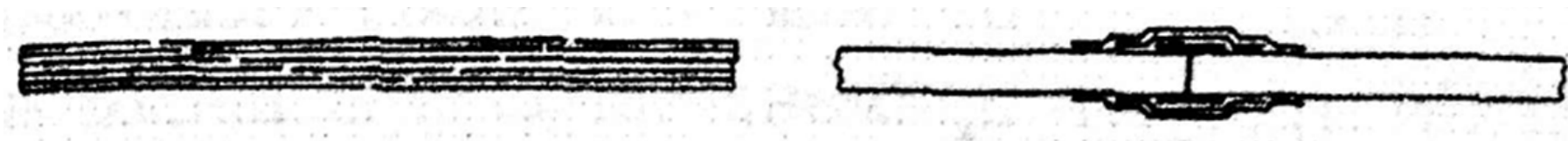


Приформовывание в автомобилестроении



При изготовлении крупногабаритных кузовных конструкций (многоместных кабин грузовых и специальных автомобилей, корпусов плавающих машин, кузовов легковых автомобилей и т. д.) в единичном и мелкосерийном производстве соединение элементов часто осуществляется приформовыванием (см рисунок).

Для повышения прочности ступенчатых соединений по краям соединений применяют эластичный клей, а при соединении высокомодульных материалов типа углепластиков — низко модульные накладки из стекловолокна.





Приформовывание в автомобилестроении



При проектировании кузовных конструкций из стеклопластиков следует учитывать особенности приформованных соединений, заключающиеся в следующем:

- 1) приформованное соединение хуже работает на отрыв, чем на сдвиг;
- 2) ширина прокладки при приформовке должна обеспечивать равнопрочность соединения с основным материалом элементов;
- 3) материал накладок при приформовке, как правило, должен быть по составу и структуре идентичен материалу соединяемых деталей;
- 4) приформовочный клей – это, как правило, связующее на основе полиэфирных, эпоксидных смол холодного отверждения из которого изготовлены соединяемые элементы конструкции;
- 5) склеивание панелей толщиной более 10 мм требует очень широкого шва и нерационально из-за повышенного расхода связующего (клея), увеличения массы соединения, числа дефектов в шве и т. д.;
- 6) швы соединений необходимо располагать по возможности в наименее нагруженных местах конструкции.



2.3. Сварные соединения



Сварка — процесс получения неразъемного соединения, основанный на тепловом движении (или химическом взаимодействии) макромолекул полимерной фазы материала, в результате которого между соединяемыми поверхностями исчезает граница раздела.

Прочность сварного соединения, как и когезионная прочность полимеров, зависит от размеров, формы, ориентации макромолекул. Этот метод предпочтителен в тех случаях, когда соединяемые детали изготовлены из одинаковых материалов и недопустимо присутствие чужеродных по отношению к применяемым материалам крепежных элементов или клеев.

В зависимости от механизма процесса различают диффузионную и химическую сварку.



Сварные соединения



В зависимости от механизма процесса различают диффузионную и химическую сварку.

Сварка композитов



Диффузионная
сварка



Химическая сварка



Сварные соединения. Диффузионная сварка



Диффузионную сварку используют для соединения термо- и эластопластов путем их нагрева или с помощью растворителя.

Высококачественное сварное соединение между разнородными материалами образуется в том случае, если параметры растворимости их полимерных фаз сопоставимы.

При диффузионной сварке материалы в зоне шва переходят в вязкотекучее состояние. Выбор способа нагрева зависит от:

- формы и размеров детали,
- свойств материала (теплопроводности, стойкости к деструкции, диэлектрических свойств, коэффициента трения и т.д.),
- типа производства.

Основным недостатком тепловых методов сварки является изменение структуры шва по сравнению со структурой остальной части изделия.



Сварные соединения. Химическая сварка



Химическая сварка эффективна при соединении реактопластов, термопластов с поперечными связями между молекулами, а также с кристаллической или ориентированной структурой.

Метод химической сварки заключается в непосредственном соединении поверхностей между собой или с помощью присадочных реагентов.

В последнем случае соединение можно считать сварным, если присадочный реагент, вступая в химическую реакцию с соединяемыми поверхностями, не создает самостоятельную непрерывную фазу.

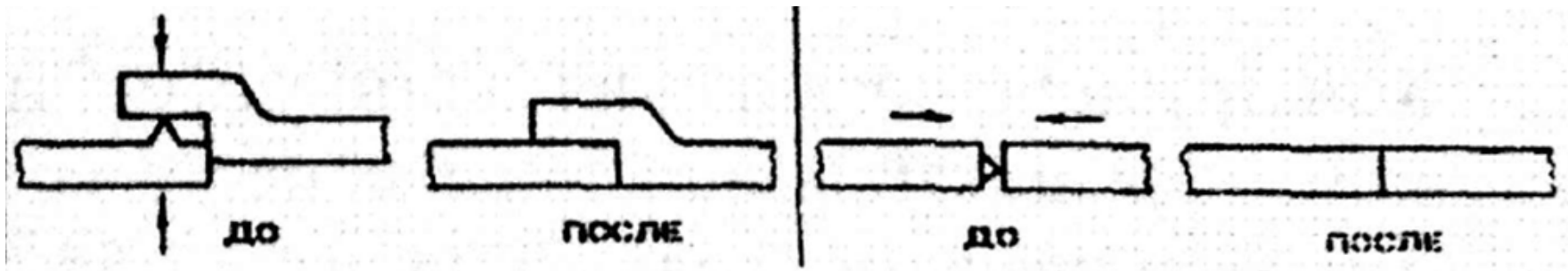
Условия химической сварки отвержденных реактопластов определяются природой функциональных групп и остаточной пластичностью материала



Сварка ПКМ в автомобилестроении



Сваркой ПКМ в автомобилестроении получают неразъемные соединения деталей из однородного полимера за счет взаимного проникновения (диффузии) частиц поверхностных слоев в расплавленном состоянии при определенном давлении прижима (см. рисунок).





Существующие методы сварки пластмасс можно условно разделить на три группы:

- сварка с помощью внешних источников теплоты (подогретый газ, инструмент, присадочный материал, трение);
- сварка с помощью внутренних источников теплоты (токи высокой частоты, ультразвука);
- химическая сварка.

Сварку первых двух типов используют для соединения термопластичных материалов. Химическая сварка является одним из перспективных методов сварки терморезистивных пластмасс на основе фенолформальдегидных, кремнийорганических, эпоксидных и ненасыщенных полиэфирных смол.



Сварка ПКМ в автомобилестроении



При выборе способа сварки ПКМ в автомобилестроении учитывают:

- природу материала,
- конструкцию соединения,
- требования к сварному соединению.

Основным преимуществом сварных соединений ПКМ в автомобилестроении является то, что при сварке можно получить конструкцию меньшей массы, чем при использовании других видов соединений, а прочность соединения при этом практически такая же, как у материала соединяемых элементов конструкции.



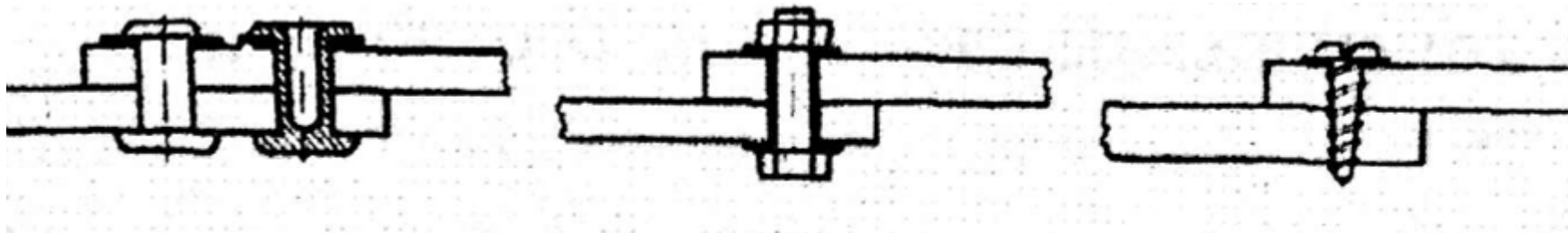
3. Механические соединения



Механические соединения подразделяют на:

- *клепаные;*
- *резьбовые;*
- *штифтовые.*

Применение того или иного соединения зависит от вида нагрузок (статические или усталостные), надежности, технологичности, стоимости и от специальных условий (необходимость получения подвижных, съемных или других видов соединений).





Механические соединения (2)



При конструировании соединений необходимо знать:

- 1) прочность соединяемых материалов при сжатии и сдвиге;
- 2) прочность при растяжении и сжатии;
- 3) предел выносливости и другие характеристики.

В отличие от обычных механических соединений узлы с ПКМ требуют применения:

- 1) специальных заклепок;
- 2) шайб;
- 3) специализированных резьбовых элементов (винтов, болтов и др.).



Технологические особенности образования отверстий в КМ



Рекомендованные соотношения для механических соединений изделий из стеклопластика

Толщина детали h , мм	Расстояние от торца l_T , мм	Расстояние от бокового края l_b , мм
$\leq 3,0$	$3,0d$	$3,0d$
$3,0..5,0$	$2,5d$	$1,5d$
$>5,0$	$2,0d$	$1,3d$

Усадка отверстий (диаметром 3...8 мм) при сверлении

Обрабатываемый материал	Значение усадки, мм
Стеклотекстолит СТЭФ	0,005 - 0,02
Стекловолокнит АГ-4С	0,01 - 0,03
СВАМ	0,02 - 0,04
Стеклотекстолит ВФТ-2ст	0,01 - 0,06
Стеклотекстолит КАСТ-В	0,01 - 0,05
Углепластик КМУ-1у	0,01 - 0,025



Рекомендованные соотношения для механических соединений изделий из стеклопластика (2)



Конструкция соединения композитов иногда требует локального наращивания толщины в месте соединения.

Диаметр шайб в механическом соединении $d_w > 2,5d$.

Для тонкостенных деталей из стеклопластика диаметр заклепки

$$d_3 = h_1 + h_2,$$

где h_1 и h_2 – толщины соединяемых элементов.



3.1. Резьбовые соединения



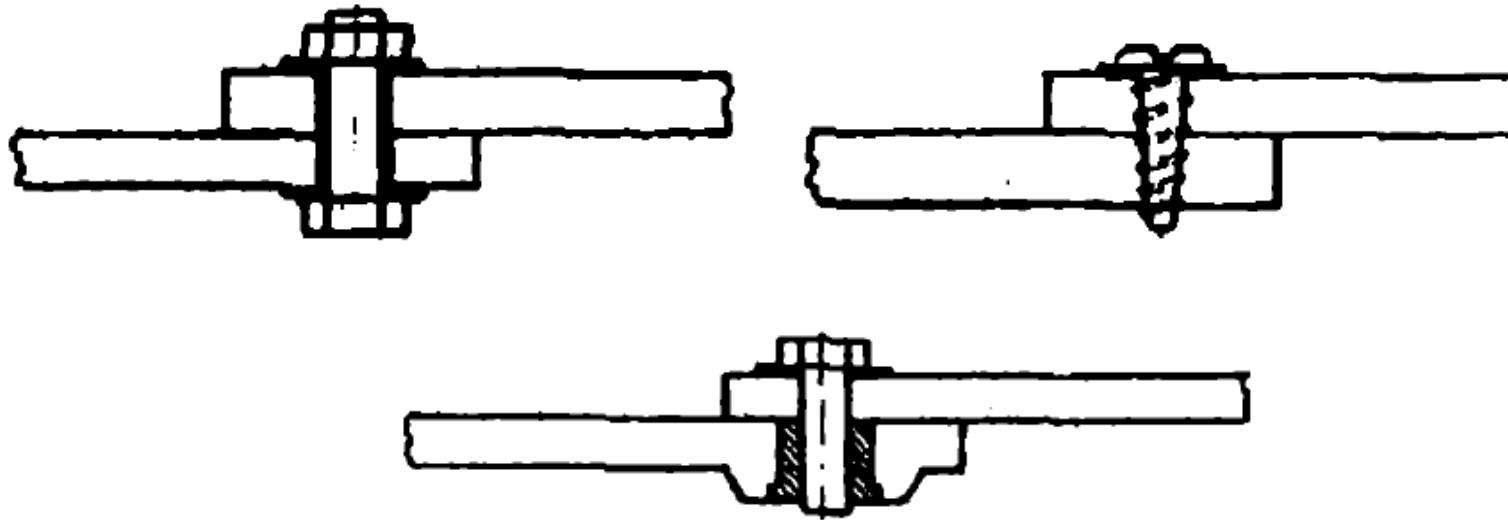
Соединения такого типа широко применяют в различных конструкциях, они характеризуются простотой исполнения, малыми осевыми размерами и массой.

Прочность резьбового соединения, как и любой другой конструкции, обусловлена:

- физико-механическими характеристиками материала;
- технологией выполнения резьбы;
- габаритами сопрягаемых деталей;
- взаимодействием сил, воспринимаемых соединением.



3.1. Резьбовые соединения





Значительное различие механических характеристик КМ и металлов, в основном предела прочности при срезе, обусловило необходимость использования “несимметричных” профилей резьб. Несимметричность зависит от соотношения допускаемых напряжений при межслойном срезе в КМ и сдвиге в металлах.



Типы несимметричных профилей резьб, используемых в соединениях композитов с металлом



Профиль	Преимущества	Недостатки
Треугольный 	Простота изготовления и контроля, большая площадь среза	Наличие радиальных напряжений при нагрузке, концентрация напряжений в острых углах
Круглый 	Малая концентрация напряжений, большая площадь среза	Наличие радиальных напряжений при нагрузке, трудность изготовления и контроля
Прямоугольный 	Отсутствие радиальных напряжений при нагрузке, простота изготовления и контроля	Уменьшение площади среза и снижение прочности из-за наличия ленточной канавки, трудность изготовления
Упорный 	Отсутствие радиальных напряжений при нагрузке, большая площадь среза	Наличие концентрации напряжений, трудность изготовления



Соединение тонкостенных оболочек из КМ, нагруженных внутренним давлением



При соединении тонкостенных оболочек из КМ, нагруженных внутренним давлением, применение треугольных и круглых профилей ограничено наличием осевой растягивающей силы. Эта сила создает радиальные напряжения сжатия, которые могут превысить допустимые значения, в результате чего оболочка разрушится в зоне резьбы от сдвиговых и радиальных напряжений.

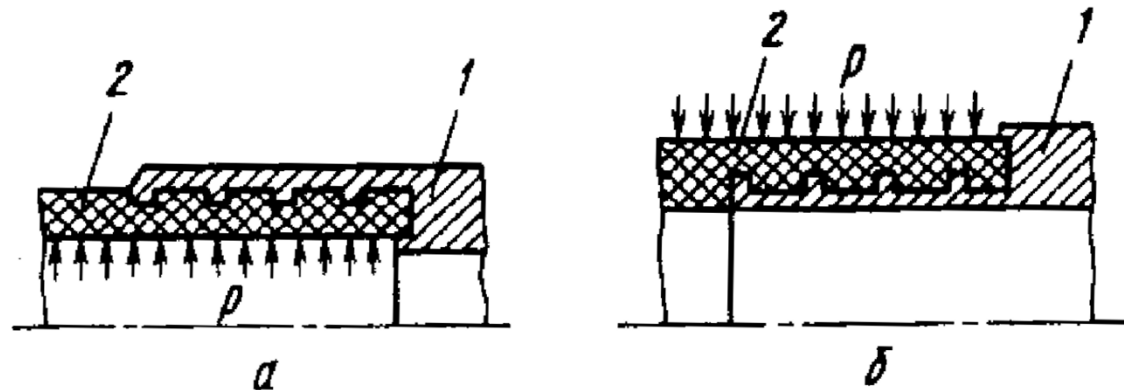
Прочность резьбового соединения КМ с металлом ограничивается главным образом сравнительно низким значением допустимых напряжений сдвига в связующем. Ее можно увеличить за счет структурного повышения сдвиговой прочности и эластичности связующего, путем использования специальных технологических мероприятий, обеспечивающих в месте соединения срез армирующего наполнителя в направлении, перпендикулярном армированию, так как в этом случае напряжение среза в семь — восемь раз больше, чем при послойном сдвиге.



Соединение тонкостенных оболочек из КМ, нагруженных внутренним давлением



Значительное увеличение сдвиговой прочности достигается также конструктивными решениями (см. рис.), позволяющими повысить прочность резьбовых соединений.



Способы расположения элемента соединения КМ с металлом в зависимости от места приложения давления p :

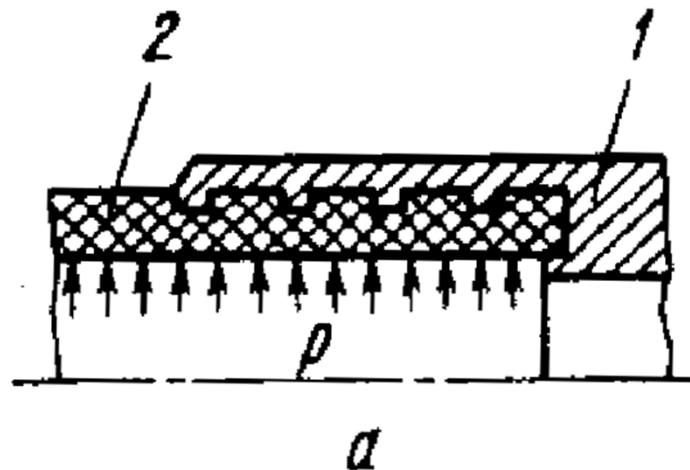
a – внутреннего; b – внешнего; 1 – металлическая обойма (кольцо); 2 – оболочка из КМ



Соединение тонкостенных оболочек из КМ, нагруженных внутренним давлением



Так как модуль упругости КМ (стеклопласты, стеклотекстолиты, органоласты) почти на порядок меньше, чем у стали, металлическую обойму (1) (кольцо) резьбового соединения в случае внутренней нагрузки следует располагать на внешней поверхности оболочки из КМ (2), см. рисунок *a*.

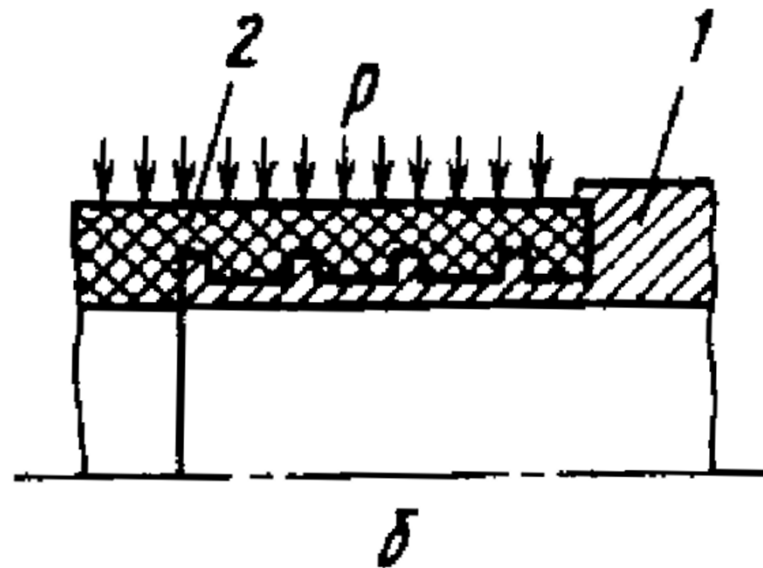




Соединение тонкостенных оболочек из КМ, нагруженных внутренним давлением



В оболочках, на которые действует внешнее давление, сопрягаемые детали (металлическая обойма – 1) и оболочка из КМ – 2) должны быть расположены в обратном порядке см. рисунок б.



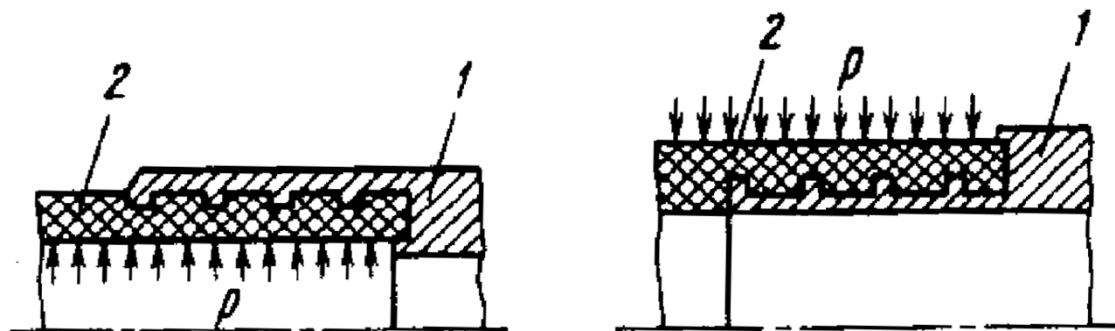


Соединение тонкостенных оболочек из КМ, нагруженных внутренним давлением



Такое конструктивное решение позволяет обеспечить прочность и герметичность соединения: под действием внутреннего или наружного давления стенки оболочки из КМ, как более пластичные, деформируясь, плотно прижимаются к металлическому кольцу.

Во избежание отслоения металлического кольца от оболочки из КМ при температурных перепадах соединения следует выполнять на клеевой прослойке, которая предотвратит отслаивание разнородных материалов сопрягаемых деталей.

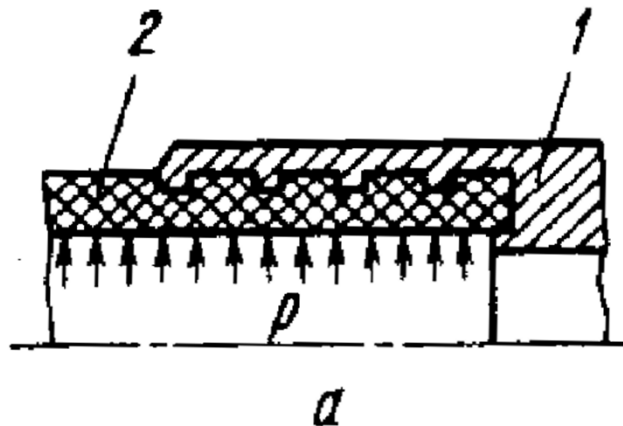




Соединение тонкостенных оболочек из КМ, нагруженных внутренним давлением



Для обеспечения прочности соединения при внешнем расположении металлического кольца, торец оболочки из КМ следует поджимать буртиком, выполняемым в кольце (см. рис. а).



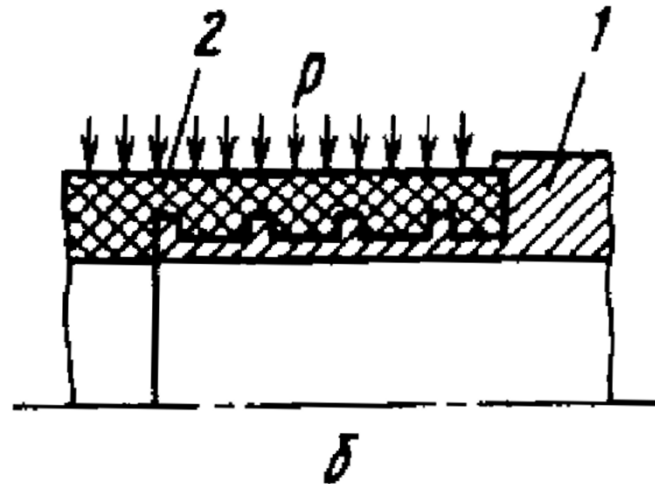
За счет утолщения оболочки в зоне резьбы высокая температура на прочность КМ влияет в значительно меньшей степени, чем в основной части оболочки.



Соединение тонкостенных оболочек из КМ, нагруженных внутренним давлением



При внутреннем расположении металлической обоймы в целях предотвращения отслоения оболочки из КМ (например, по причине ее набухания от действия влаги и других сред) рекомендуется резьбовое соединение выполнять на клею (см. рисунок б).



В этом случае его прочность повышается на 20...30 %.



Резьбовые соединения



Для устранения вредного влияния микротрещин, возникающих на поверхности резьбы в процессе ее изготовления, необходимо на нее наносить защитную полимерную пленку толщиной 5...16 мкм.

В целях обеспечения равномерного нагружения полимерного КМ (и одновременного «защемления» стенки оболочки) иногда применяют двойную резьбу. В этом случае длина свинчивания второй (внутренней) резьбы должна составлять 0,4...0,6 от длины свинчивания внешней резьбы.



3.2. Клепаные соединения



При изготовлении узлов, панелей, агрегатов клепка до настоящего времени является наиболее распространенным видом неразъемного соединения, так как она обеспечивает требуемые характеристики прочности, надежности и ресурса работы конструкции.



Соединение композитов
сплошной и трубчатой
заклепкой

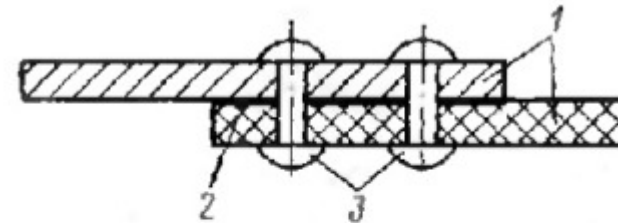


Рис. 9. Клее-клепаное соединение полотнищ из различных материалов.

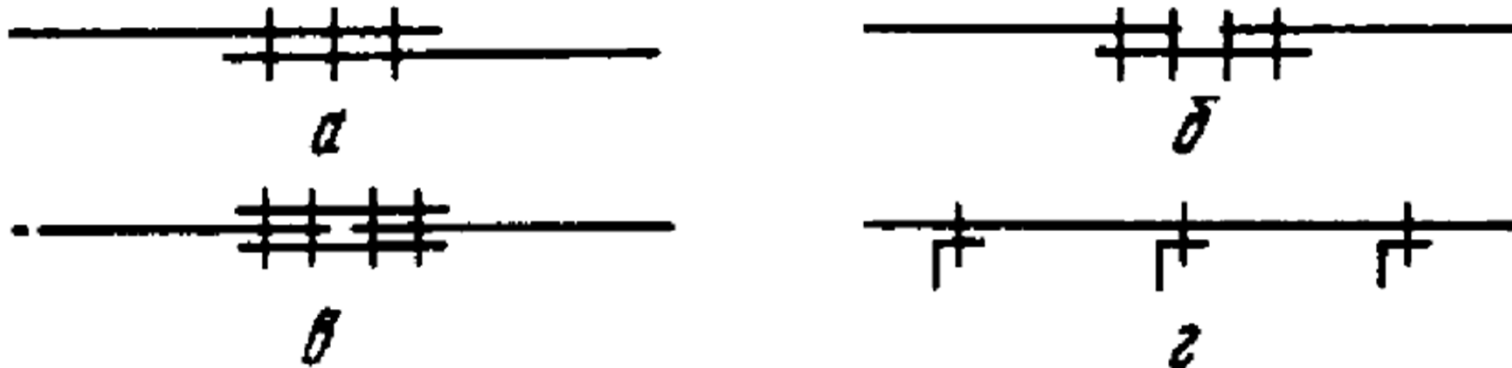
1 — соединяемые полотнища из металла (легкий сплав) и ПКМ, 2 — клеевая прослойка; 3 — заклепки.



3.2. Клепаные соединения



В зависимости от сочетания соединяемых элементов и характера передачи сил с одного элемента конструкции на другой различают следующие виды клепаных швов: внахлестку, встык с одной накладкой, встык с двумя накладками и стрингерные.



Виды клепаных швов:

a – внахлестку; *б* – встык с одной накладкой; *в* – встык с двумя накладками; *г* – стрингерные



Клепанные соединения



Процесс соединения деталей заклепками включает в себя следующие операции:

- 1) сверление или пробивание отверстия под заклепку;
- 2) зенкование или штамповку гнезда под закладную головку;
- 3) заклепку при потайной клепке;
- 4) установку заклепки в отверстие;
- 5) сжатие деталей и образование замыкающей головки, т.е. собственно клепку;
- 6) контроль качества соединения.



Клепанные соединения



В производстве наиболее широко применяют холодную клепку. При этом способе лучше заполняется отверстие стержнем заклепки, не снижаются механические свойства материалов и значительно облегчается производство клепальных работ.

Заклепки изготавливают из легких сплавов и сталей с выступающей и потайной закладными головками.

Применяемые заклепки нормализованы и имеют шифр, указывающий:

- 1) форму закладной головки,
- 2) марку материала,
- 3) диаметр и длину стержня.



Клепанные соединения



Процесс клепки заключается в осаживании стержня заклепки и образовании из выступающей части стержня замыкающей головки требуемой формы. Наиболее распространена плоская форма замыкающей головки заклепки. Общая длина заклепки L для соединения пакета толщиной S определяется следующим соотношением:

$$L = S + 1,3 \cdot d_3,$$

где $1,3 \cdot d_3$ - припуск на замыкающую головку; d_3 – диаметр заклепки.



Клепанные соединения



При образовании замыкающей головки стержень заклепки, заполняя отверстие, деформируется неравномерно, причем его диаметр со стороны закладной головки будет меньше, чем со стороны замыкающей головки.

Образование замыкающих головок заклепок осуществляют несколькими методами, наиболее распространенными из них являются:

- клепка ударом,
- прессованием,
- раскатыванием.



Методы клепки



Клепку ударом выполняют, как правило, ручным или пневматическим клепальным молотком. Удары молотка наносят по замыкающей головке, а к закладной головке прижимают поддержку.

Клепку прессованием осуществляют на клепальных прессах. В этом случае заклепку вставляют в отверстие и включают пресс. При работающем прессе автоматически подводится верхний пуансон, пакет сжимается, и с помощью нижнего пуансона образуется замыкающая головка.

Клепку раскатыванием выполняют на специальных раскатных станках или для этих целей используют универсальные сверлильные станки. При этом в процессе клепки происходит сжатие пакета и раскатывание замыкающей головки заклепки специальным пуансоном-раскатником.



Клепанные соединения



Одним из важных требований, предъявляемых к целому ряду клепанных конструкций, является обеспечение необходимой степени герметичности в процессе эксплуатации:

- поддержание избыточного давления,
- предотвращение утечек топлива,
- защита различных отсеков и агрегатов от проникновения в них агрессивных жидкостей и газов.

Утечка воздуха, газов или жидкостей в швах в основном происходит через зазоры между контактными поверхностями пакетов, между элементами заклепок (стержень, головка) и стенками отверстия.



Клепанные соединения



Уменьшить или полностью устранить утечки можно герметизацией шва, в том числе путем нанесения слоя герметика на поверхность заклепки, за счет установки упругих прокладок, резиновых колец, и применения заклепок с уплотнительным пояском.

Упругие прокладки из металла, резины, асбеста, пластмасс не имеют адгезии — сцепления с поверхностями соединяемых деталей — и проявляют свои герметизирующие свойства только в момент приложения силы сжатия. В случае ослабления силы сжатия на прокладку эффект герметизации пропадает. Поэтому упругие уплотнители не нашли широкого применения в производстве.



Клепанные соединения



Заклепочные швы герметизируют специальными материалами, которые обладают рядом преимуществ по сравнению с упругими прокладками. Герметизирующие материалы имеют адгезию к соединяемым деталям, допускают взаимное перемещение соединяемых деталей без нарушения герметичности, их применяют в виде пленок, паст и жидкостей.

Кроме обычных стержневых заклепок в ряде производств применяют специальные заклепки. При одностороннем подходе в зону клепки используют заклепки для односторонней клепки: с сердечником, гайки-пистоны, заклепки с высоким сопротивлением срезу. В элементах конструкции, испытывающих большие срезающие силы, применяют заклепки с высоким сопротивлением срезу (для соединений с двухсторонним подходом) или болты-заклепки.



Клепанные соединения



Один из способов уменьшения технологических остаточных напряжений в зоне клепки — применение высокопрочных заклепок переменной жесткости специальной геометрической формы, позволяющих значительно уменьшить усилие клепки и технологические остаточные напряжения.

Для повышения местной прочности КМ следует использовать способ введения металлических шайб, которые устанавливаются под замыкающую головку заклепки. Это также приводит к значительному уменьшению технологических остаточных напряжений в зоне клепки и улучшает качество соединения.



Клепанные соединения



В случае применения заклепок с промежуточным элементом, выполненным в виде обжимающих стержень заклепки колец, модуль упругости которых больше, чем у заклепки, также уменьшаются контактные давления на сопрягаемых поверхностях заклепки и стенки отверстия и появляется возможность осуществлять клепку многослойных пакетов с легким наполнителем.

В последние годы широко исследуются процессы магнитно-импульсной клепки, клепки с наложением ультразвуковых колебаний, с электронагревом. Внедрение новых технологических процессов позволит значительно улучшить качество клепанных конструкций.

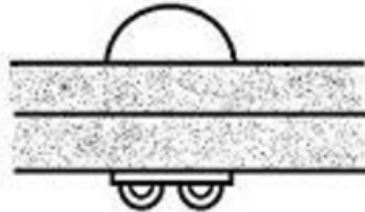
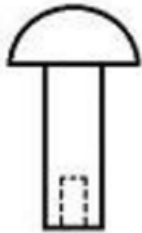


Виды заклепок для ПКМ



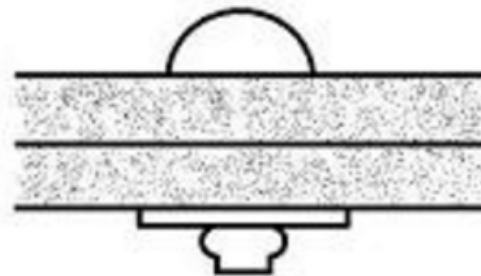
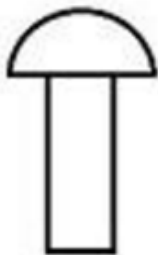
Трубчатая заклёпка

Используется с металлической подкладкой или шайбой. Необходим доступ с двух сторон профиля.



Сплошная заклёпка

Используется с подкладкой или шайбой. Необходим доступ с двух сторон профиля.



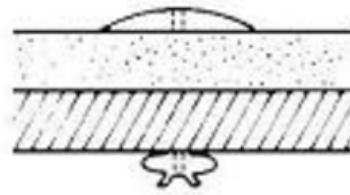


Виды заклепок для ПКМ

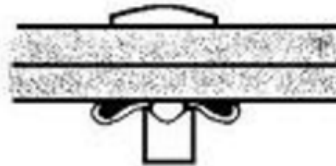


Глухая [односторонняя] заклёпка

Односторонняя сборка. Стекловолокно с металлом, рекомендуется использовать шайбу.



Нейлоновая заклёпка



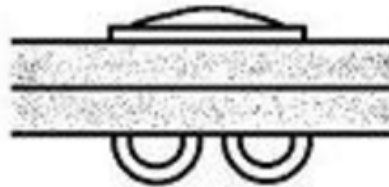


Виды заклепок для ПКМ



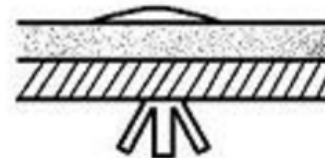
T-заклёпка (Aluminum)

Стекловолокно со стекловолокном. Хорошее распределение нагрузки.



DRIVE заклёпка (Aluminum)

Стекловолокно с металлом. Односторонний демонтаж.

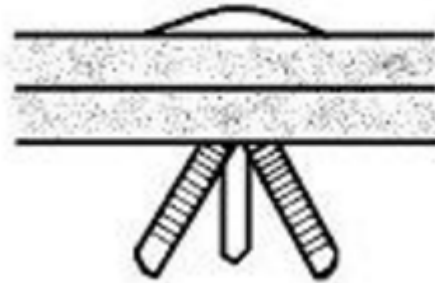




Виды заклепок для ПКМ

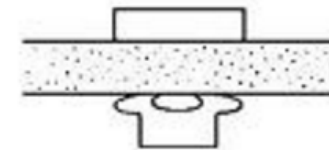
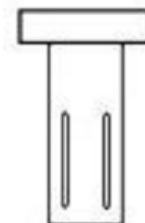
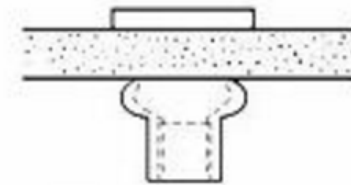
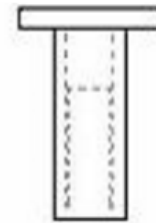


DRIVE заклёпка (Nylon)



Глухая резьбовая вставка

Накладывает металлическую резьбу на профиль.

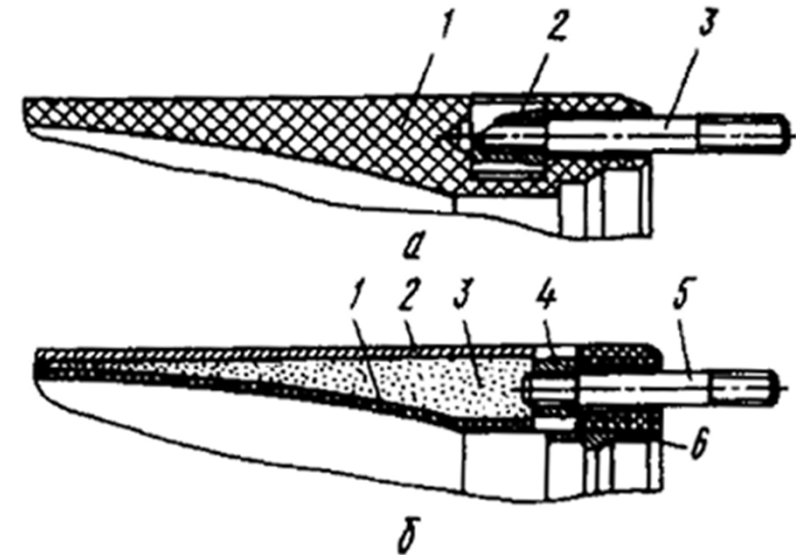




3.3. Шпильчно-болтовые соединения



Для соединения высоконагруженных конструкций из композиционных материалов чаще всего используют способы с применением различного вида болтов и шпилек. Особенностью шпильчно-болтового соединения является наличие концевых утолщений в элементах конструкции, радиальных штифтов, болтов (или резьбовых шпилек с гайками и шайбами), расположенных в профилированных отверстиях и пазах концевых утолщений (см. рисунок).



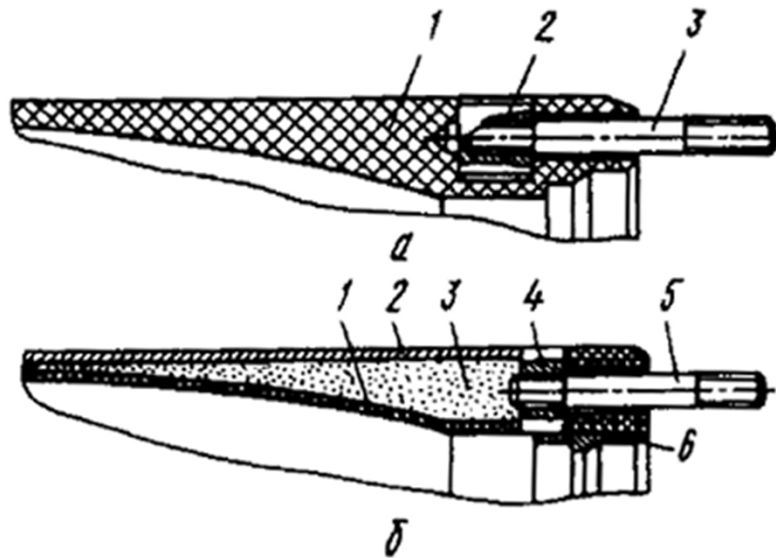
Разъемные фланцевые стыки:
а – штифто-болтовое соединение (*1* – фланцевое утолщение; *2* – штифт; *3* – шпилька); *б* – комбинированный стык с наполнителем (*1* – внутренняя силовая оболочка; *2* – наружная силовая оболочка; *3* – наполнитель; *4* – штифт; *5* – шпилька; *6* – установочный шпангоут)



Шпильно-болтовые соединения



Проблема создания соединений подобного типа охватывает широкий круг вопросов, включающих выбор параметров формования и механической обработки утолщений, выбор конструктивных параметров крепежных элементов, обеспечение прочности в местах перехода от усиленной утолщенной зоны к основному материалу конструкции.



В зависимости от особенностей конструкций, в которых применяют штифто-болтовые или штифто-шпильные способы соединения, и требований к ним, последние выполняют как с наружными, так и с внутренними фланцевыми утолщениями.



Шпильчно-болтовые соединения



Формование краевых утолщений под штифто-болтовые или штифто-шпильчные соединения в зависимости от назначения конструкции, уровня и характера эксплуатационных нагрузок осуществляют различными способами.

Среди этих способов следует отметить:

- специальную намотку кольцевых утолщений,
- дополнительную приформовку,
- введение специальных упрочняющих элементов.

Введение в зону утолщения высокопрочного изотропного материала (металлической фольги, борных пленок и т.д.) позволяет повысить значения упругих и прочностных характеристик композиционного материала.

Так, использование в зоне соединений стеклопластиковых труб дополнительного армирования из бороалюминиевых лент позволяет повысить прочность конструкции на 20...30 % при снижении массы стыка на 10... 15 %.



Шпильно-болтовые соединения



В ряде случаев высокий уровень нагрузок не позволяет ограничиться однорядными расположениями отверстий под штифты. Тогда применяют многорядные соединения — соединения с шахматным расположением отверстий и т.п.

При использовании в многорядных соединениях штифтов с формой поперечного сечения в виде овалов, эллипсов и шпилек различной длины значительно снижается уровень концентраций напряжений и равномерно загружаются все ряды соединения.



3.4. Самозаклинивающиеся соединения



Одним из способов местного повышения предельных значений сдвиговых характеристик КМ является использование действующей эксплуатационной нагрузки.

Суть процесса состоит в следующем: в профиль соединения вводят элементы, имеющие, как правило, двусторонние заклинивающие поверхности различной формы.

При эксплуатации нагрузка преобразуется так, что в месте соединения возникают значительные радиальные силы, вызывающие местное радиальное сжатие слоев по всей толщине детали из КМ. В свою очередь наличие сжимающих сил приводит к увеличению сил сцепления между элементарными слоями КМ, а следовательно, и к резкому повышению предельных значений межслоевой жесткости и прочности.



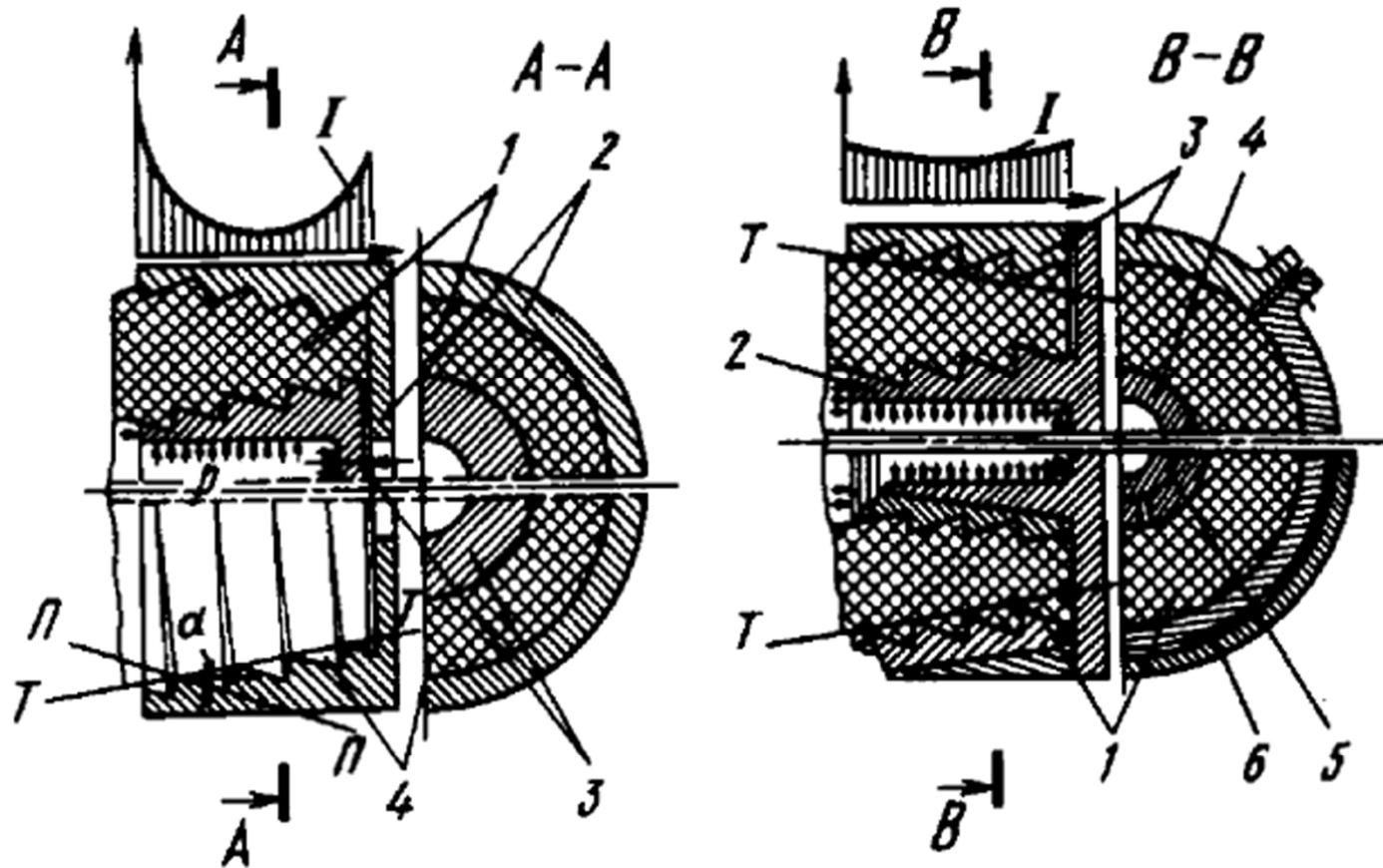
Самозаклинивающиеся соединения



Важно отметить, что значения радиальных сжимающих сил, а также местные значения предельных сдвиговых характеристик КМ пропорциональны значению действующей эксплуатационной нагрузке.

Способ соединения с использованием заклинивающихся поверхностей обеспечивает увеличение прочности по мере увеличения нагрузки, воспринимаемой соединяемыми деталями. В частности, для оболочек давления чем больше внутреннее давление, действующее на соединяемые оболочки, тем большую нагрузку может выдержать место соединения. Отсюда и происходит название соединения — самозаклинивающееся.

Использование эксплуатационной нагрузки для упрочнения мест соединения обеспечивает условия, при которых радиальные сжимающие силы возникают только в момент приложения этой нагрузки. Следовательно, в отличие от обычных резьбовых соединений в соединениях с заклинивающимися поверхностями релаксации напряжений в нагруженном состоянии отсутствуют, что дает наименьшие потери исходной прочности с течением времени.



Самозаклинивающиеся соединения:

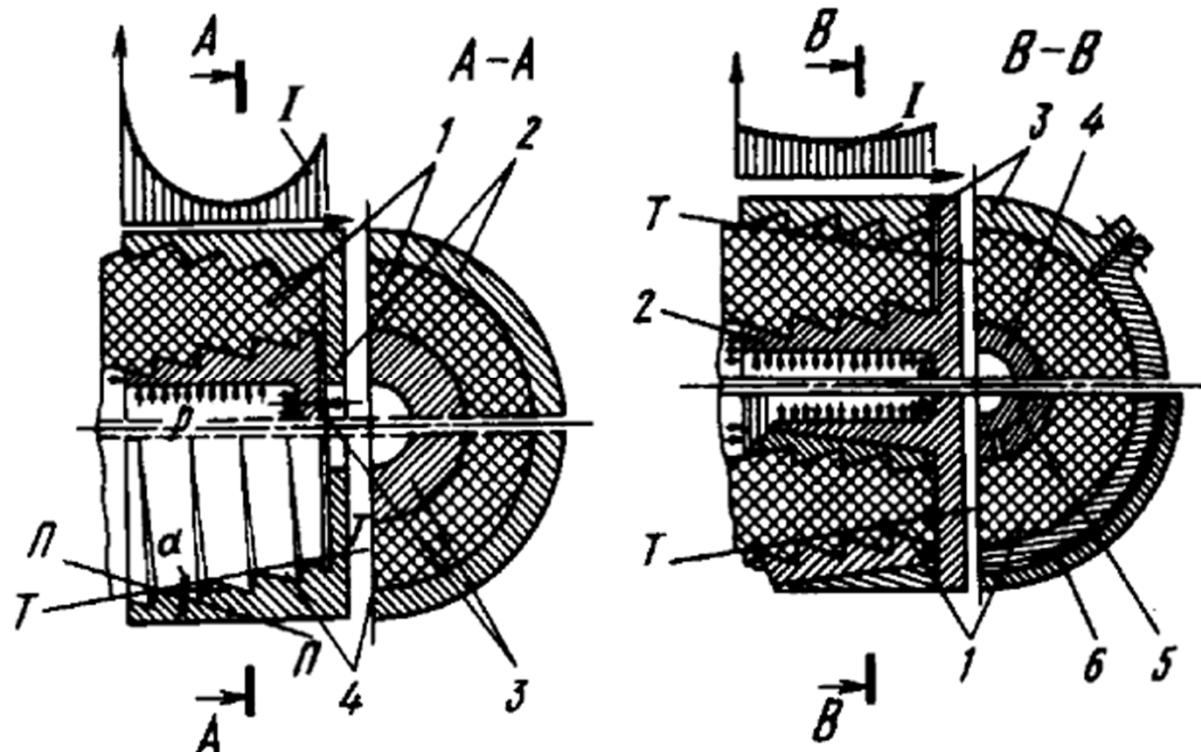
a – косоосимметричное; *б* – симметричное; *I* – эпюра сдвигающих напряжений; *1* – слой КМ; *2, 3* – металлические обоймы; *4, 5* – переходные втулки; *6* – пружинные кольца

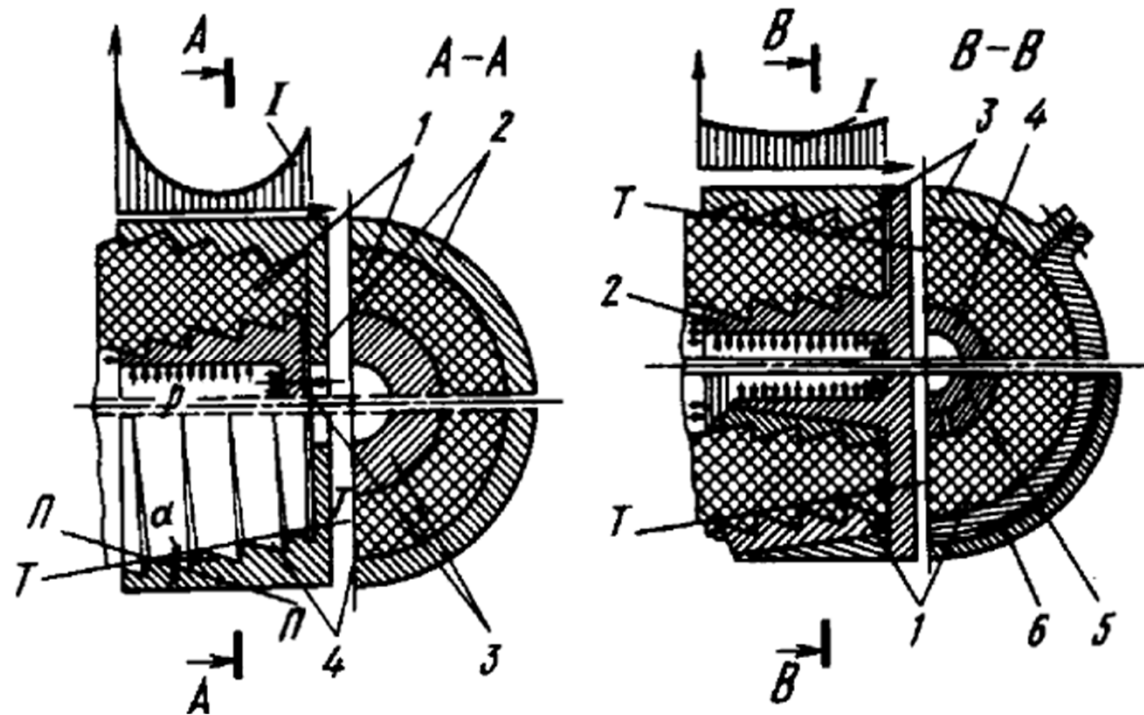


Самозаклинивающиеся соединения

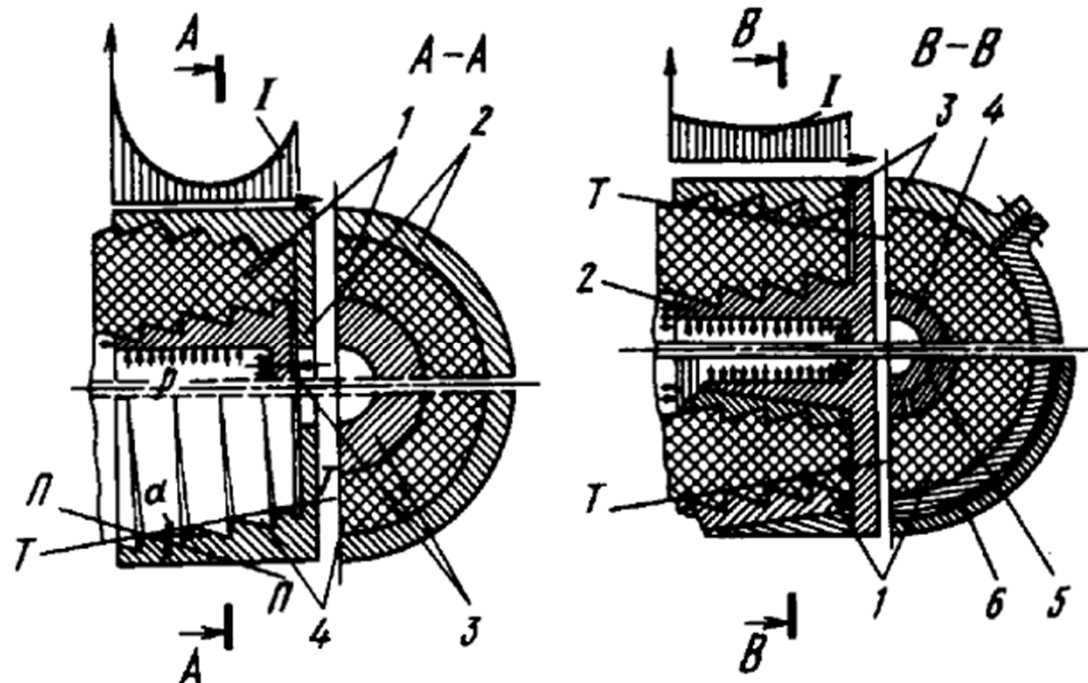


В целях более равномерного распределения действующих осевых нагрузок по толщине детали из КМ заклинивающиеся профили располагают не на цилиндрических, а на взаимно конических сочленяющихся поверхностях (см. рисунок). В результате этого в передачу осевых нагрузок включается максимальное число элементарных слоев КМ, необходимых для обеспечения равнопрочности.





Сравнительно равномерное распределение нагрузки по длине соединения можно получить специальным профилированием заклинивающихся поверхностей. Закон этого профилирования должен соответствовать эпюре распределения сдвиговых напряжений в соединении.



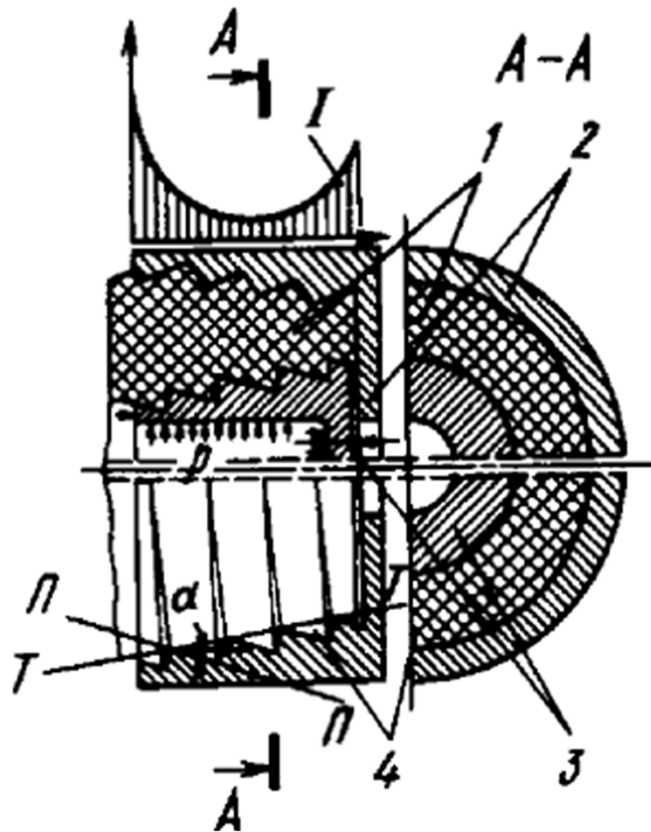
На рисунке показаны варианты специального профилированного кольцевого самозаклинивающегося соединения, обеспечивающего равномерное распределение действующей нагрузки как по толщине детали, так и по длине соединения. Следует заметить, что неравномерное распределение нагрузки по длине соединения - явление отрицательное, так как при этом не могут быть полностью использованы все имеющиеся возможности для повышения прочности.



Самозаклинивающиеся соединения



Если профиль заклинивающихся поверхностей по длине сочленения остается неизменным (см. рис.), то закономерность повышения предельных значений сдвиговых характеристик по длине сочленения будет аналогична характеру распределения сдвиговой нагрузки.



Вследствие этого незначительно уменьшается отрицательное влияние неравномерности распределения сдвиговой нагрузки по длине сочленения. Здесь отдельные витки профиля, как и в обычных резьбовых соединениях, оказываются загруженными разными по значению сдвиговыми напряжениями. Различие в запасах прочности по сдвигу для каждого витка профиля будет значительно меньше, чем в обычных резьбовых соединениях.

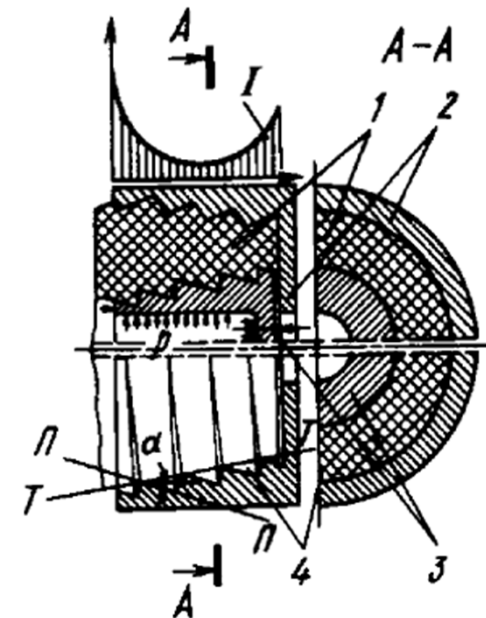


Самозаклинивающиеся соединения



Конструктивное оформление самозаклинивающихся соединений выполняется различным в зависимости от назначения соединяемых деталей и характера нагрузок. Геометрия профиля соединения и рациональное соотношение его заклинивающихся и опорных элементов для каждого типа соединения (болтового, фланцевого или цилиндрического) соответственно будут различными.

Рассмотрим схему самозаклинивающихся соединений на примере разъемного соединения труб из КМ с металлическими днищами.

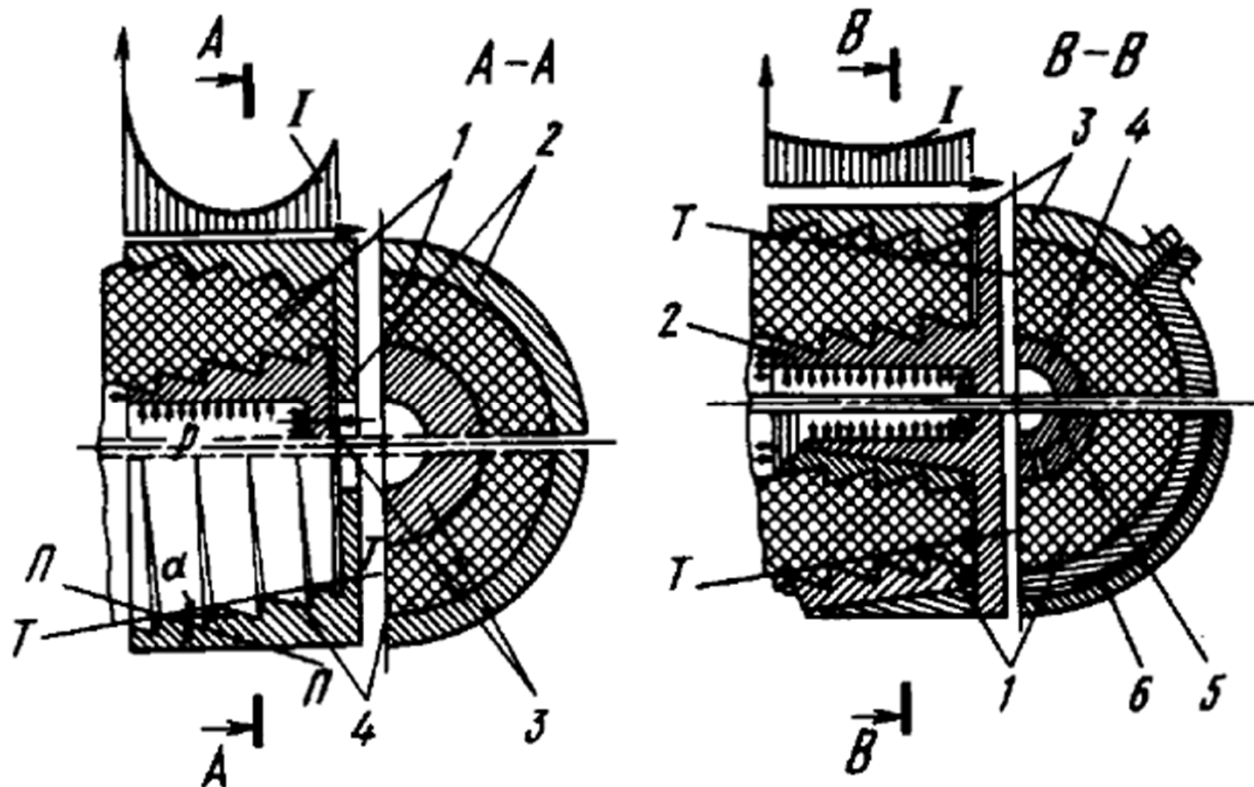




Самозаклинивающиеся соединения



Труба нагружена внутренним давлением p . Самозаклинивающиеся профили образованы расположенными на конических поверхностях Т-Т специальными заклинивающимися поверхностями П - П, которые могут быть выполнены как по винтовым (см, рис а), так и по кольцевым линиям (см. рис. б).

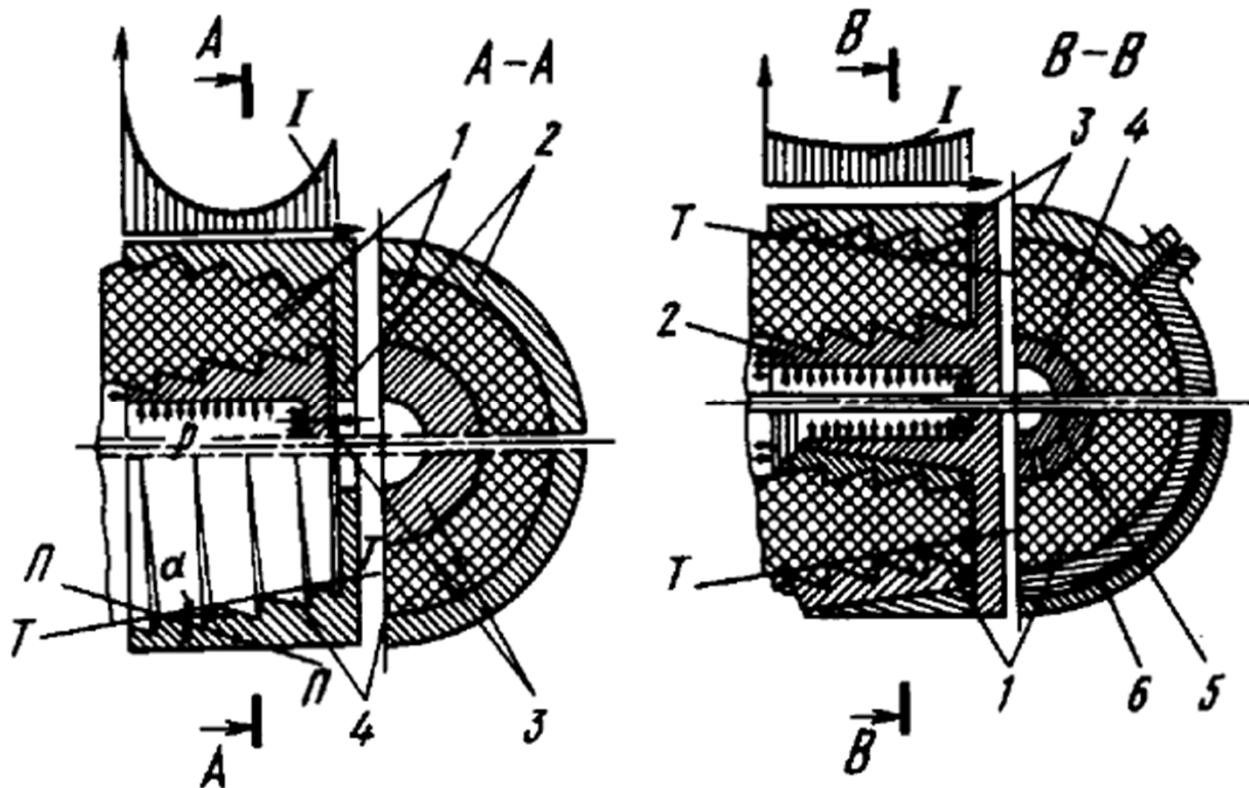




Самозаклинивающиеся соединения



Углы наклона заклинивающихся поверхностей к оси симметрии соединения могут изменяться. В самозаклинивающемся профиле (см. рис. **а**) углы наклона α остаются неизменными по всей длине соединения, а в профиле на рис. **б** эти углы по длине соединения изменяются в соответствии с заданным законом.



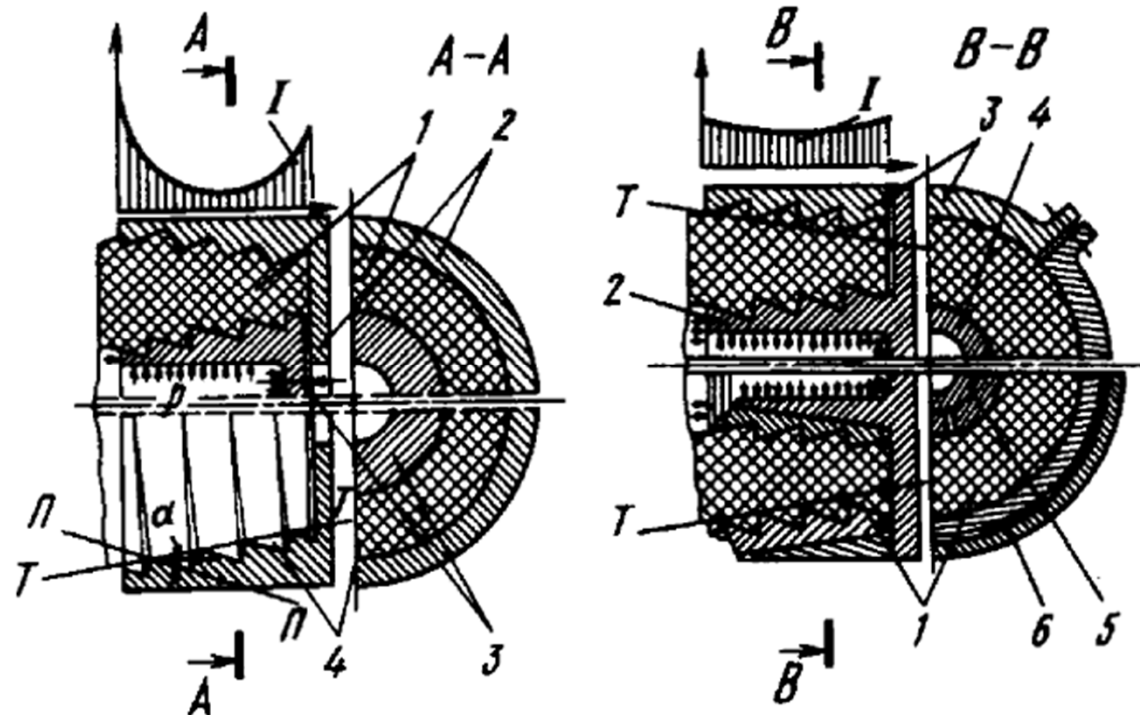
Внутренний и внешний самозаклинивающиеся профили могут быть расположены между собой симметрично и кососимметрично.



Самозаклинивающиеся соединения



Принцип соединения состоит в соединении элементов по двум взаимно коническим поверхностям Т - Т с двумя металлическими обоймами 2 и 3. Внутренние обоймы 2 выполнены как одно целое с металлическими днищами. Днища 2 и внешние металлические обоймы 3 соединены между собой крепежными болтами.

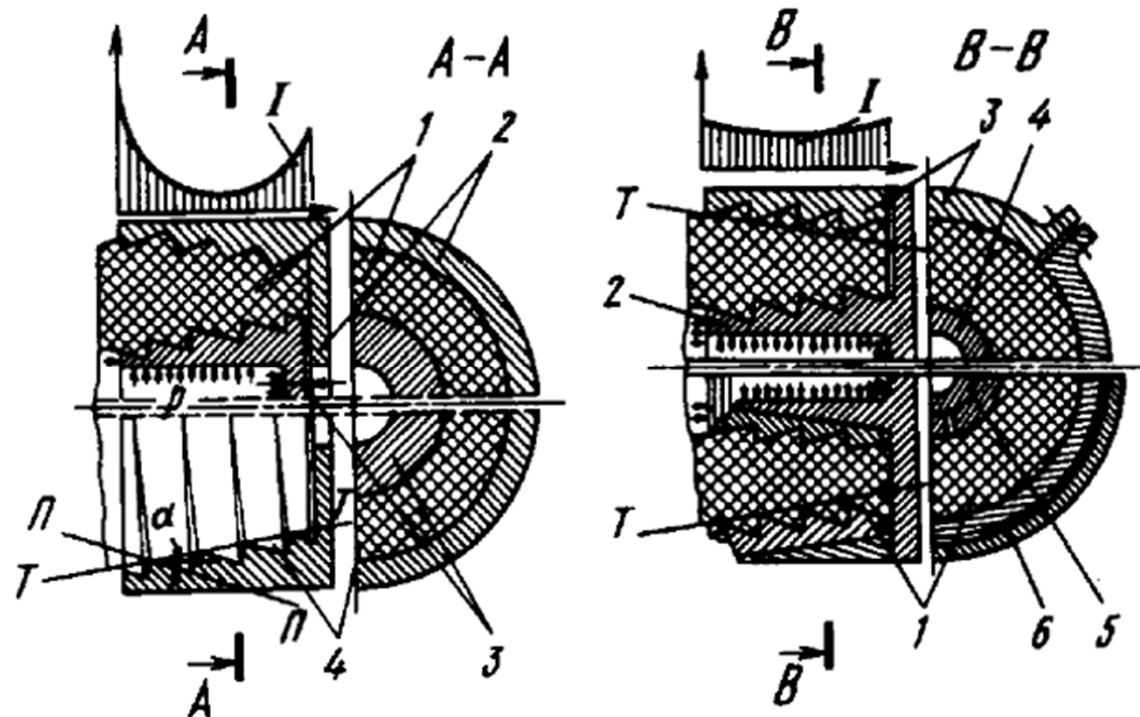




Самозаклинивающиеся соединения



Такое решение позволяет связать днища и металлические обоймы в единую силовую конструкцию, в которой эксплуатационная нагрузка (внутреннее давление) равномерно распределяется между внутренними и внешними металлическими обоймами.

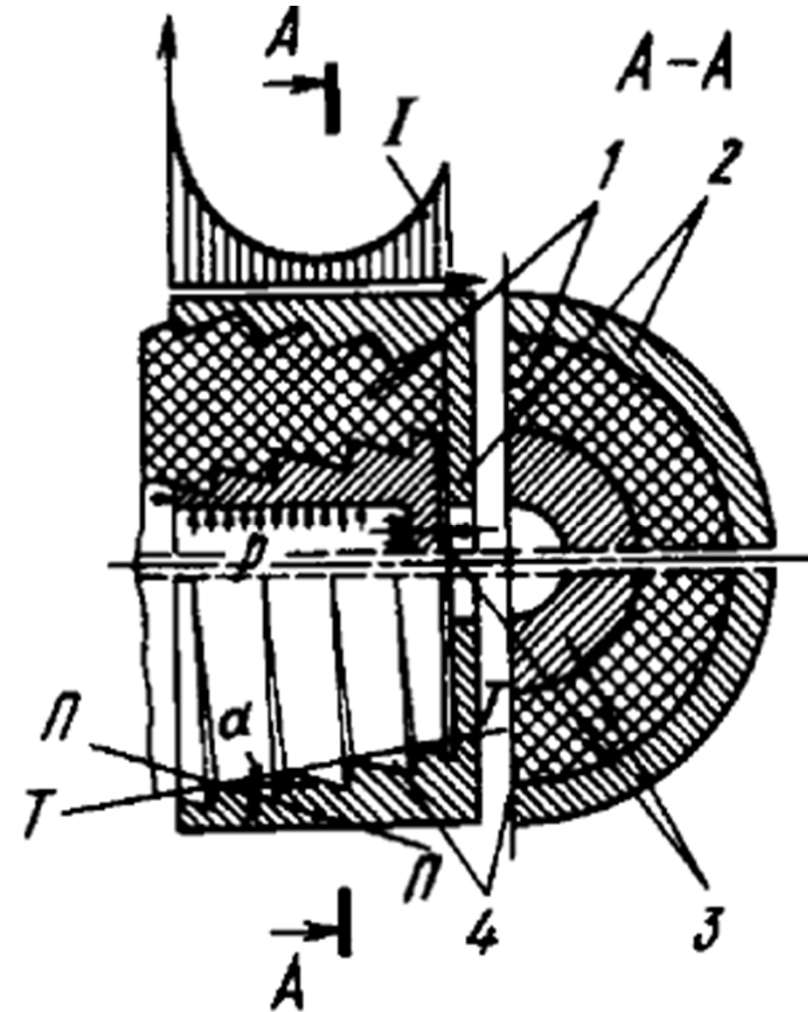




Самозаклинивающиеся соединения

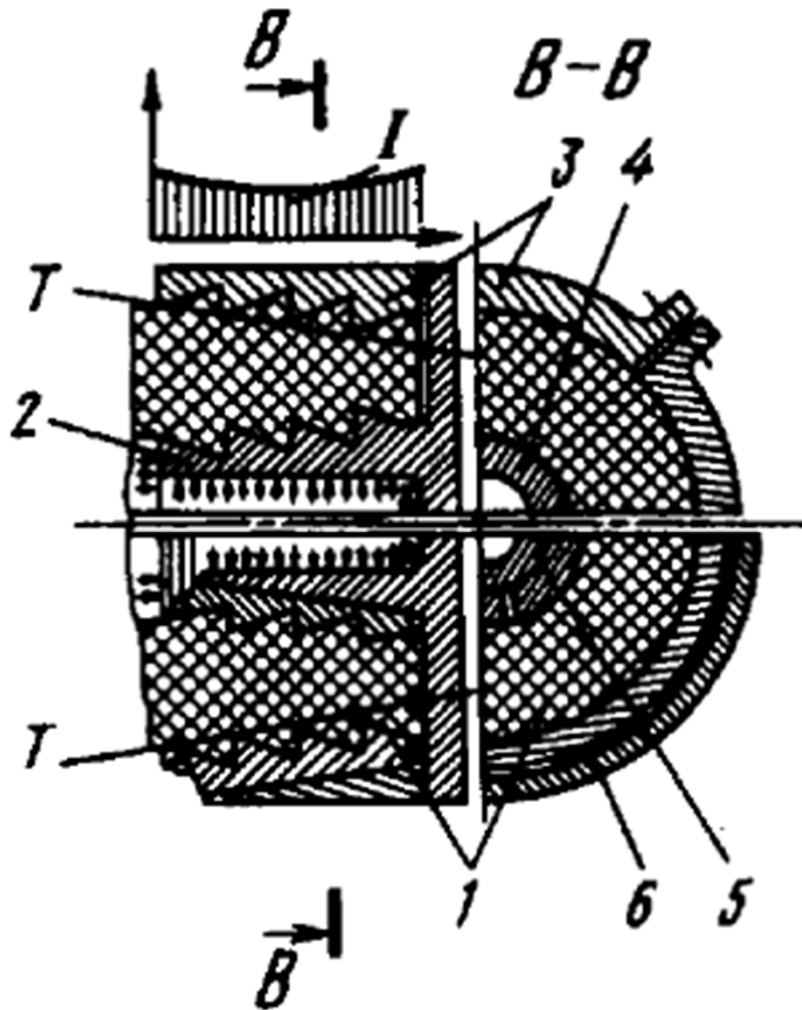


При сборке соединения винтовой профиль (см. рис. а) позволяет наворачивать внешнюю и внутреннюю металлические обоймы на трубу до упора или с определенным радиальным натягом. При выполнении места соединения в виде кольцевого самозаклинивающегося профиля внутренняя и внешняя металлические обоймы изготавливают составными, что позволяет “надевать” их на кольцевой самозаклинивающийся профиль.





Самозаклинивающиеся соединения



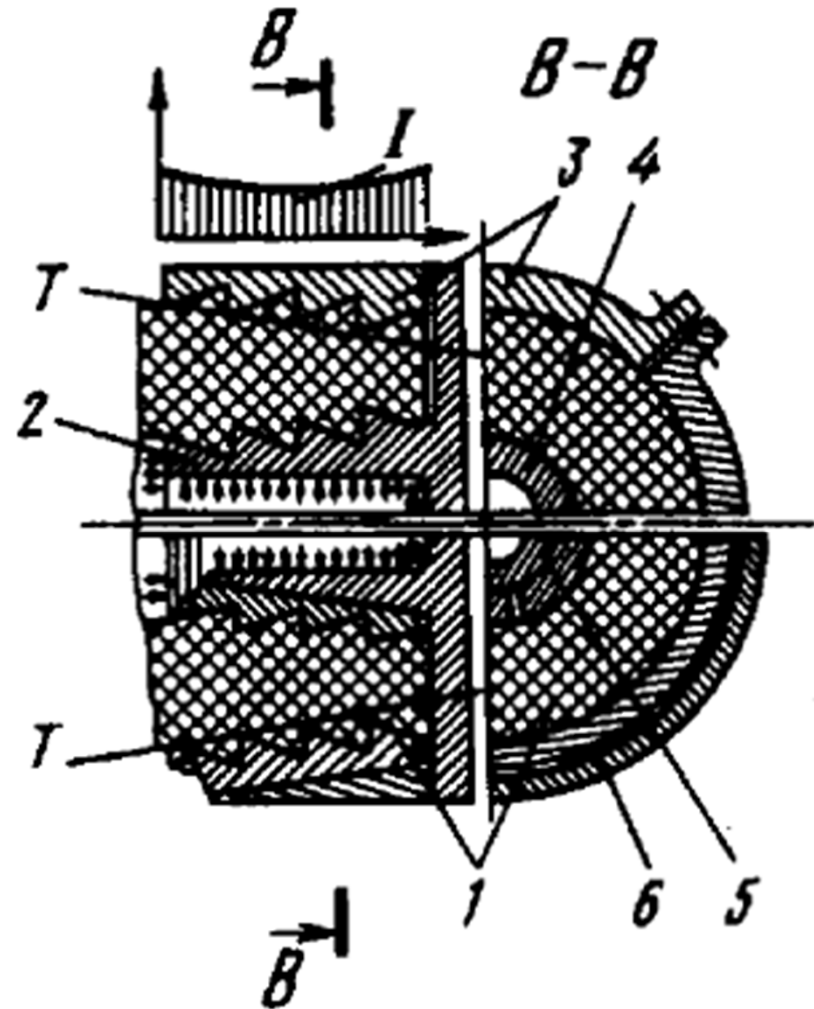
В приводимом варианте (см. рис. б) внешняя обойма – разрезная, а внутренняя обойма выполнена целой и соединена с трубой неразъемно в процессе изготовления. Такая конструкция узла соединения позволяет предварительное радиальное натяжение при необходимости выполнять с помощью стяжных болтов внешней разрезной обоймы.



Самозаклинивающиеся соединения



Сборка узла и создание предварительного радиального натяга при симметричном кольцевом самозаклинивающемся соединении (см. рис. б) обеспечивается использованием секционных (разрезных) переходных втулок 4 и 5, которые удерживаются в собранном состоянии пружинными кольцами 6.

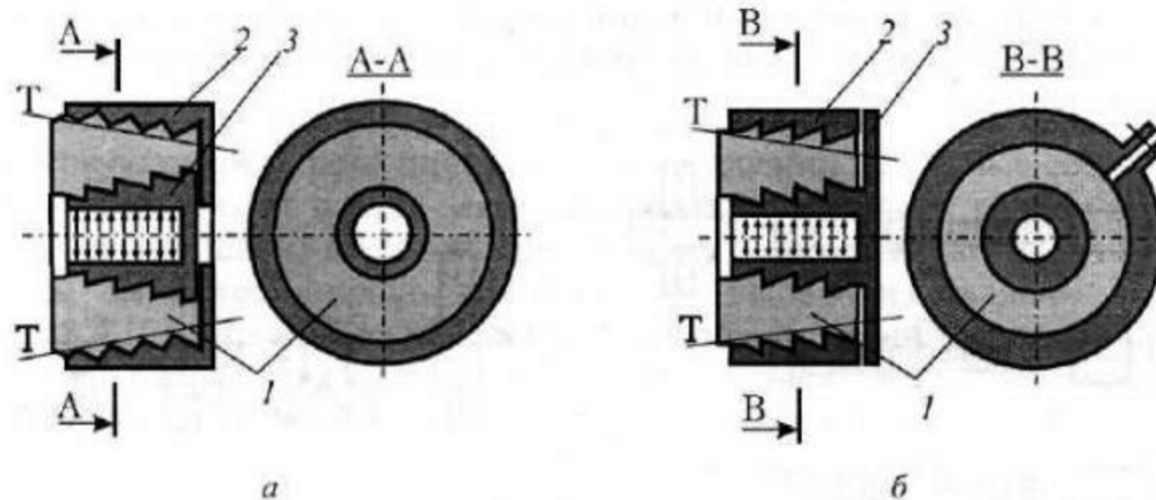




Самозаклинивающиеся соединения



Отверстия под фланцевые соединения могут быть выполнены в отвержденной оболочке механическим путем или в процессе изготовления оболочки формованием. Как показали результаты исследований, самозаклинивающиеся профили в ряде случаев обеспечивают высокую прочность соединения при незначительной длине профилированной части (около двух-трех витков).





3.5. Сшивные и игольчатые соединения



Как известно, с уменьшением диаметра крепежных элементов (КЭ) прочность соединений возрастает. Изучение механизма разрушения соединений и оценка предельного состояния соединений в зоне концентрации напряжений показали, что это возрастание связано с относительным увеличением количества площадок сдвига в КМ и статической природой разрушения КМ

Вводя понятие о зоне разрушения λ_0 , ответственной за разрушение всего соединения, и связывая величину с диаметром КЭ, получим уравнение для определения диаметров КЭ и отверстий, которые не влияют на прочность.

Наиболее прочные соединения можно получить с применением сшивки материалов и специальных иголок.



Сшивные и игольчатые соединения



Для определения диаметров крепежных элементов, имеющих небольшие размеры, воспользуемся следующей формулой:

$$d_{\text{к.э}} \leq \left[\frac{BL(l + \omega)^m}{i \bar{K}_T m \bar{K} t_1 (\bar{K} t_2 + 1)} \right]^{1/2},$$

где B, L — ширина и длина шва соответственно; l — длина нахлестки; ω — степень усиления зоны стыка; i — количество КЭ в шве; m — показатель однородности механических свойств в КМ; K_T — теоретический коэффициент концентрации напряжений около отверстия, нагруженного локальной силой; t_1, t_2 — относительные шаги между КЭ и между рядами; \bar{K} — коэффициент, характеризующий изменение значений K в зоне отверстия; K — значение критерия прочности в точке с максимальной концентрацией напряжений.



Сшивные и игольчатые соединения



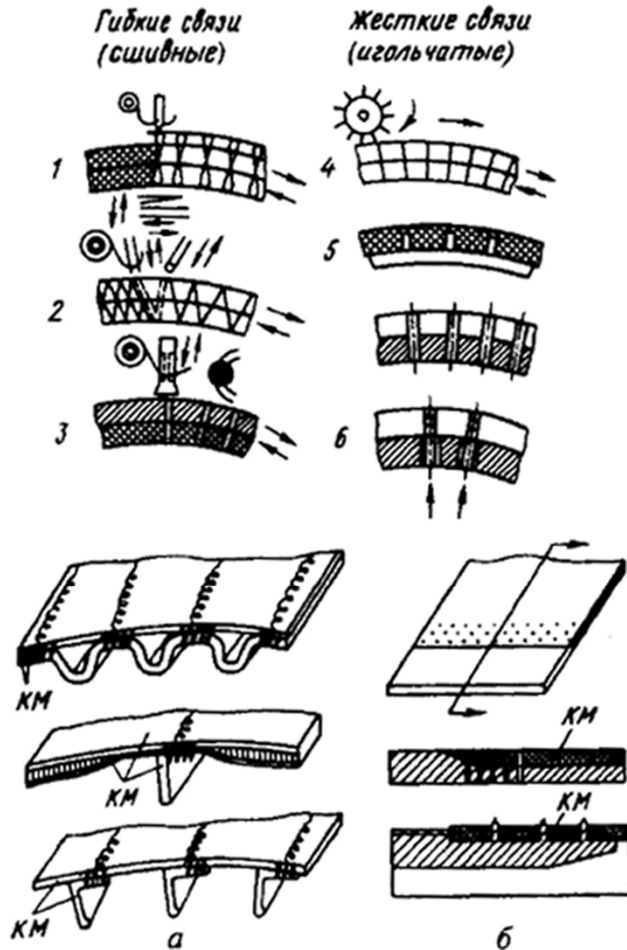
Анализируя формулу, видим, что в зависимости от геометрических параметров шва и механических свойств КМ диаметр КЭ $d_{к.э.} = 0,3...1,5$ мм, коэффициент прочности шва $\varphi_w \approx 100$ %.

$$d_{к.э.} \leq \left[\frac{BL (l + \omega)^m}{i \bar{K}_T m \bar{K} \bar{t}_1 (\bar{K} \bar{t}_2 + 1)} \right]^{1/2},$$

Выполнить соединения с такими размерами КЭ на базе традиционных клепаных и болтовых соединений затруднительно, поэтому целесообразно осуществлять соединение КМ с помощью сшивных и игольчатых соединений.



Способы выполнения шивных и игольчатых соединений



Способы выполнения шивных (а) и игольчатых (б) соединений:

1 – шивка двусторонняя; 2 – односторонняя; 3 – шивка-пробивка; 4 – установка иголок с помощью барабана; 5 – совмещение деталей, одна из которых имеет иголки; 6 – поэтапное внедрение иголок в процессе намотки

Экспериментальные исследования прочности игольчатых и шивных пятирядных соединений показали, что прочность соединения близка к 100 % (92...96 %), а долговечность при циклических нагрузках соединений с отверстиями $d = 1$ мм в 18 раз превышает долговечность соединений с отверстиями $d = 6$ мм.



4. Комбинированные соединения



Сочетание клеевого и механического соединений позволяет устранить недостатки, присущие обоим способам соединений. Применительно к клеємеханическим соединениям следует отметить два важных обстоятельства, которые требуют решения:

- обеспечение совместности деформации механического и клеевого соединений;
- необходимость создания требуемого давления в клеевой прослойке при ее полимеризации.



4.1 Клееклепаное соединение



Технологический процесс клееклепаных соединений принципиально возможно выполнять двумя способами:

- 1) клепка по отвержденному клею (отверждение клея осуществляется в специальном приспособлении);
- 2) клепка по неотвержденному клею (отверждение клея без применения приспособлений).

Необходимое давление при полимеризации клея в соединении обеспечивается за счет сил затяжки заклепок или технологических болтов.

Второй способ является предпочтительным, так как процесс сборки с применением клея можно осуществлять в сборочном приспособлении без использования специальных автоклавов.



Клееклепаное соединение

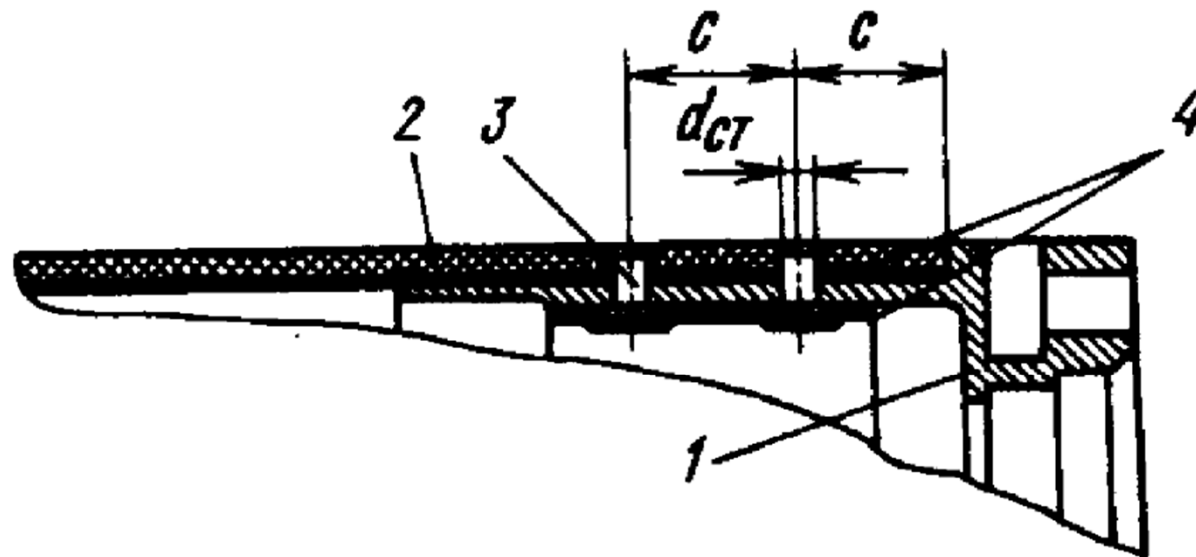


Процесс клепки конструкций, содержащих неотвержденные клеевые прослойки, сопровождается сложными явлениями, происходящими в клеевой пленке и КМ. В результате давление, необходимое для полимеризации клея, распределено неравномерно по длине шва. В зависимости от жесткости соединяемых листов, создаваемых нагрузок и физико-механических свойств клеевых прослоек, распределение давлений в клеевом шве может значительно меняться и, как следствие, изменять качество клееклепаного соединения.

Для повышения прочности клееклепаных соединений предпочтительно клепку пакета выполнять после отверждения клея, а при клепке по сырому клею создавать давление на клеевую пленку в несколько этапов.



Клееклепаное металлопластиковое соединение



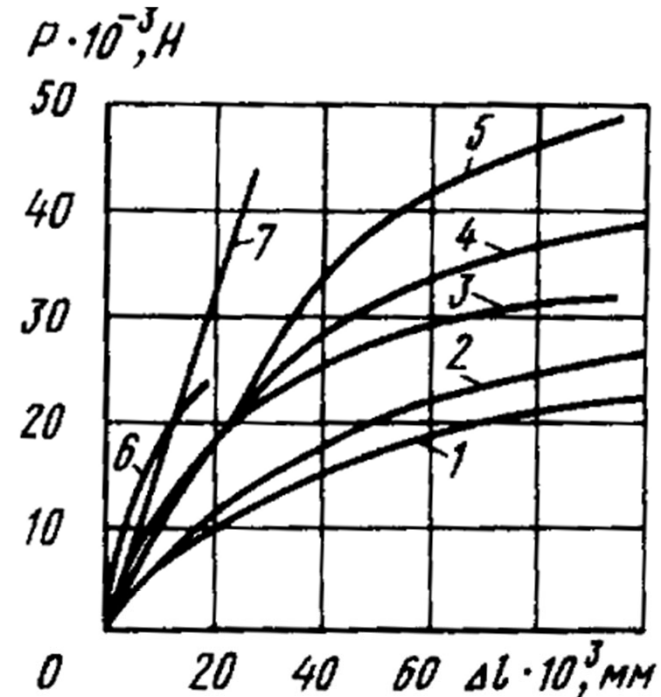
Клееклепаное металлопластиковое соединение:
1 – шпангоут; 2 – оболочка; 3 – заклепка; 4 – герметик



Клееклепаное соединение



Зависимость деформаций от нагрузки для различных видов клееклепанных соединений (материал пакета КМУ-3+Д19, материал заклепок из С15) показана на рисунке.



Графики зависимостей деформации Δl от нагрузки P , материала и количества i заклепок:

1 – 3 – клепаные соединения при $i = 1...3$ соответственно; 4 – 5 – клееклепанные по сырому и отвержденному клею соответственно (клей ВК-36; $i = 3$); 6 – 7 – клеевые (клей ВК-34 и клей ВК-36; пленка)



Клееклепаное соединение



Следует отметить, что, как правило, деформативность клепаных соединений значительно выше клеевых. Это приводит к снижению прочности клееклепаных соединений из-за несовместности деформаций. В этом случае необходимо повышать жесткость соединений за счет увеличения количества, прочности и жесткости заклепок или за счет повышения эластичности клеев и повышения их адгезии к КМ.

Клееклепаные соединения, выполненные по отвержденному клею, вследствие более благоприятного распределения внутренних напряжений в КМ и клее обладают большей прочностью и выносливостью.



4.2 Клеесшивные и клееигольчатые соединения



Во многих случаях целесообразно в качестве комбинированных соединений применять клеесшивные и клееигольчатые соединения.

При этом способ сшивки и установки иголок существенно не изменяется, однако располагать иголки предпочтительно в местах наибольшей концентрации напряжений в клеевом шве, т.е. по концам нахлестки или по краям усиливающих накладок.

Наличие гибких и жестких связей в клеевом шве обеспечивает лучшее включение накладок и КМ в совместную работу и компенсирует недостаточную прочность клеевых соединений на неравномерный отрыв.



Клеесшивные и клееигольчатые соединения



Существует ряд прогрессивных способов выполнения сшивных и игольчатых соединений.

Сшивные соединения стеклопластика на основе ткани ТСУ-8/3-ВМ—78 выполняют нитками из органоволокон от одного до пяти рядов. После сшивки проводят отверждение связующего ЭДТ-10.

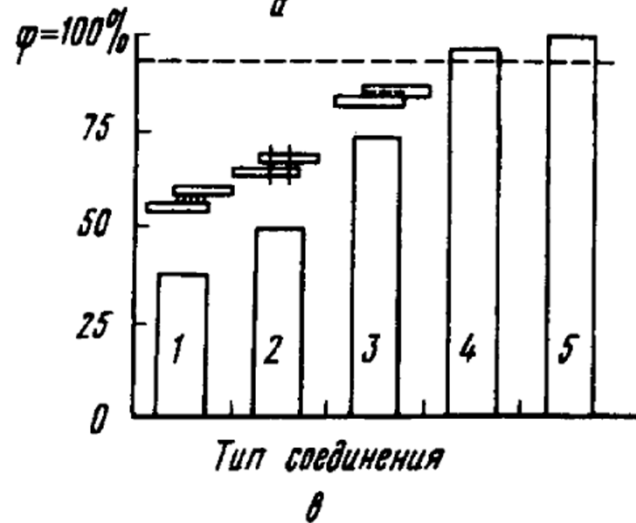
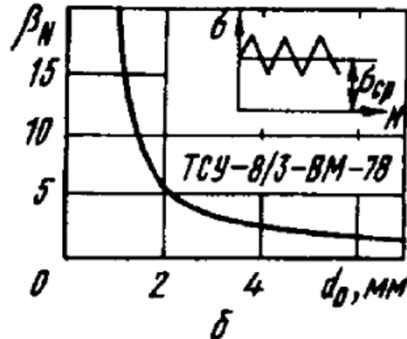
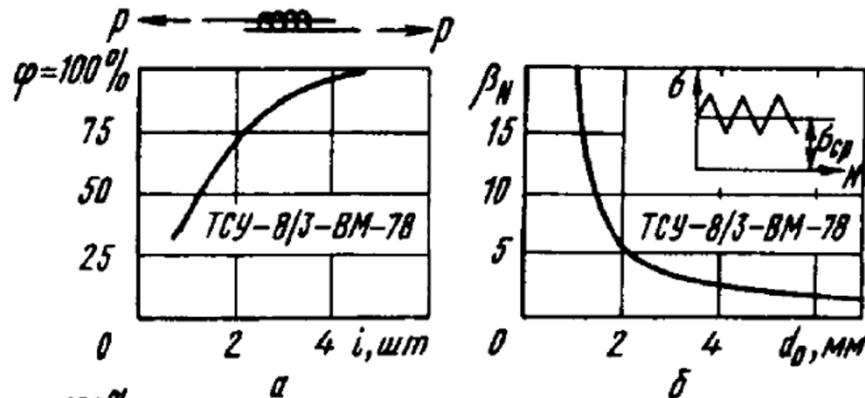
Игольчатые соединения осуществляют двумя способами:

- запрессовкой игл в стыковой шпангоут;
- механической обработкой предварительно выдавленных ребер на многошпиндельном полуавтомате.

Последующее соединение выполняют в процессе намотки оболочки и одновременной замотки стыковых и игольчатых элементов.



Клеесшивные и клееигольчатые соединения



Сравнительная характеристика прочности сшивных соединений представлена на рисунке.

Сравнительная характеристика прочности сшивных и игольчатых соединений:

a – коэффициент увеличения прочности; b – коэффициент увеличения долговечности; β – сравнительная характеристика соединений; 1 – клеевые; 2 – клепаные; 3 – резьбовые; 4 – игольчатые (запрессовка); 5 – игольчатые (механическая обработка); $г$ – тип образца



Клеесшивные и клееигольчатые соединения



Анализируя результаты испытаний соединений на прочность, выяснили, что с уменьшением диаметра отверстий под КЭ увеличивается не только прочность шва, но и долговечность.

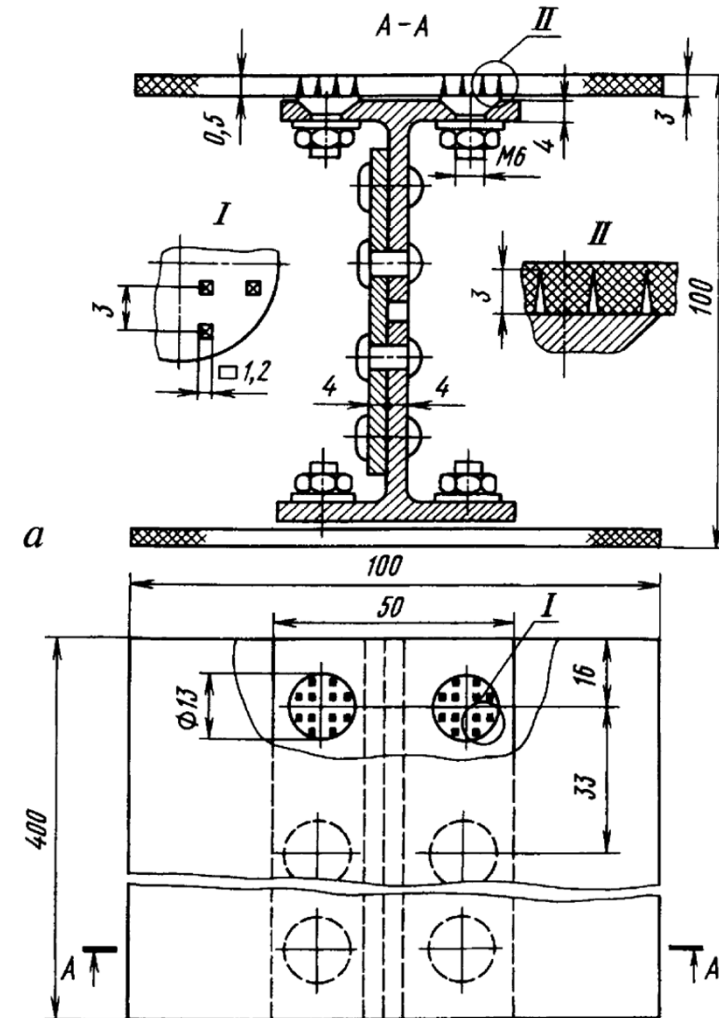
Поэтому дальнейшая отработка технологии изготовления сшивных и игольчатых соединений и создание специализированного полуавтоматического оборудования для их выполнения являются насущной задачей, решение которой позволит резко расширить объем применения КМ в силовых конструкциях.



5. Примеры выполнения соединений высоконагруженных узлов и деталей



Наибольшей несущей способностью и жесткостью обладает КТР, в котором металлическая полка лонжерона снабжена крепежными элементами и приформована к обшивке (рисунок а).



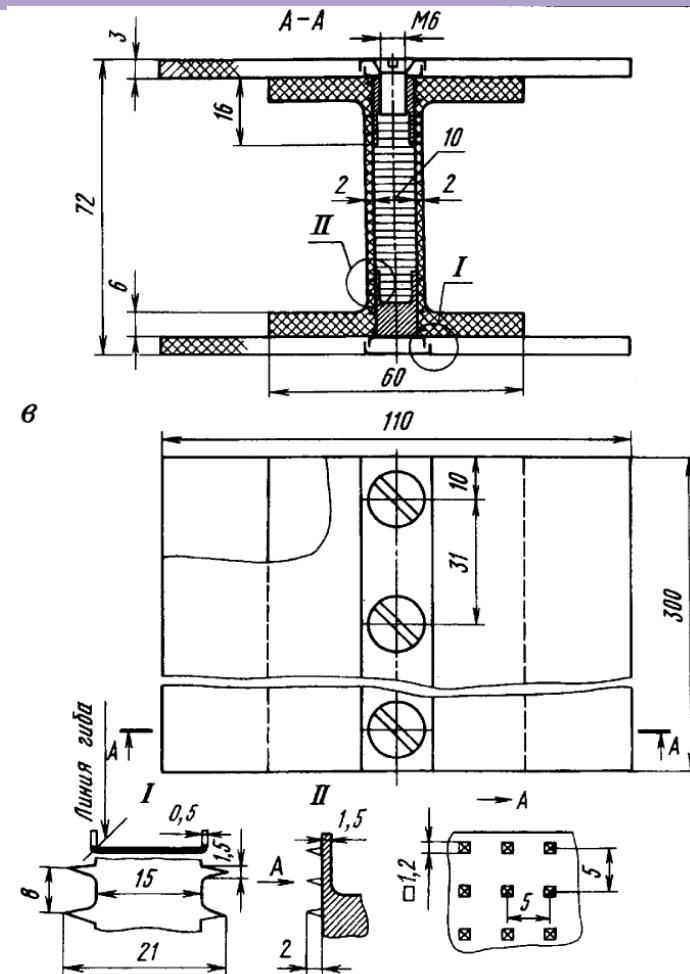
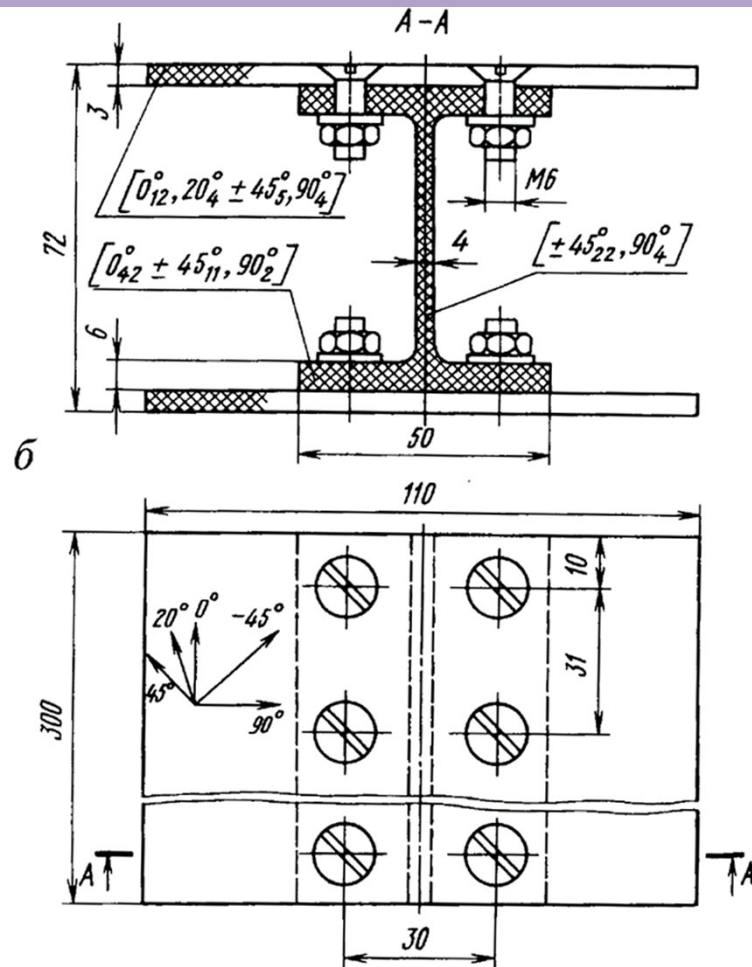
Конструкторско-технологические решения соединения обшивки с лонжероном:
а – соединение углепластиковой обшивки с металлическим лонжероном; б – соединение углепластиковой обшивки с углепластиковым лонжероном; в – соединение углепластиковой обшивки с трехслойным композитным лонжероном



Примеры выполнения соединений высоконагруженных узлов и деталей

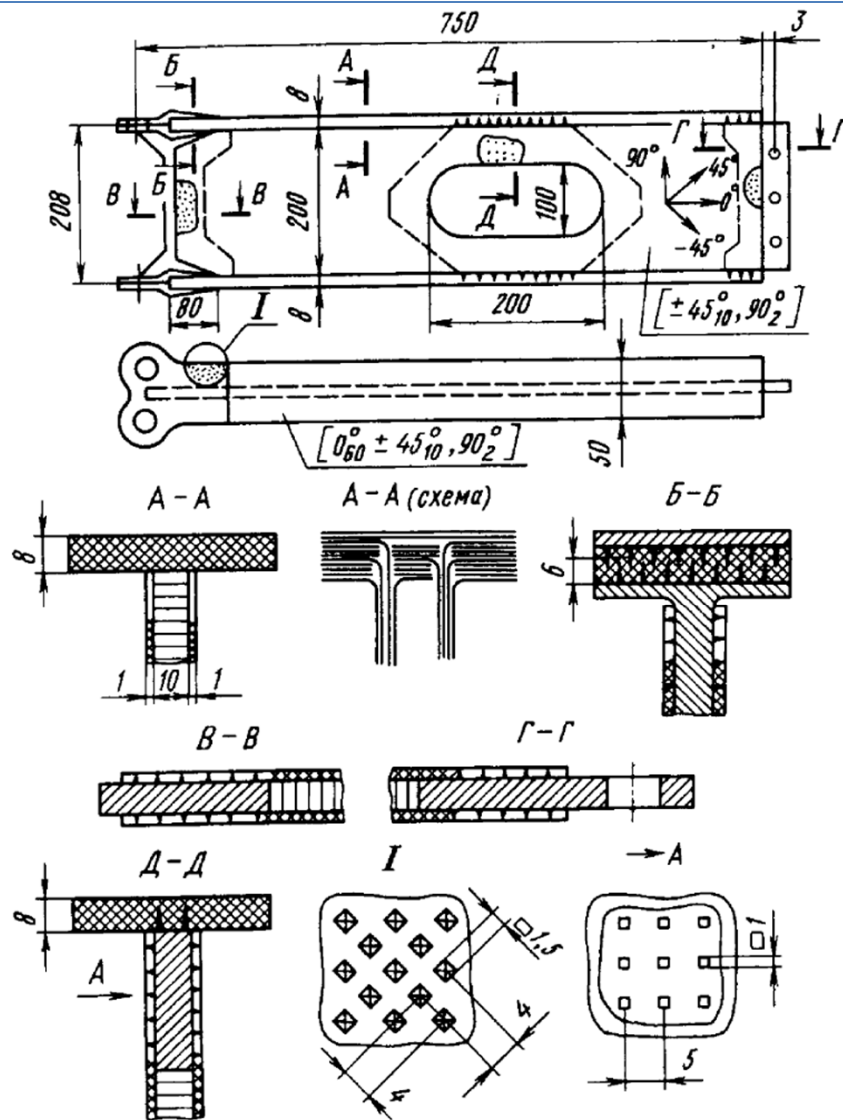


Для соединения композитных конструкций элементов крыла наиболее оптимальными являются КТР, представленные на рисунке б, в.





Примеры выполнения соединений высоконагруженных узлов и деталей



Конструкторские решения соединений композитного лонжерона и силовых нервюр

Стыки и соединения лонжеронов и силовых нервюр. Конструкция лонжерона из КМ представлена на рисунке.

Напряжения с полок лонжеронов на обшивку крыла передаются с помощью двух накладок из сплава Д16АТ, образующих горизонтальный стыковочный узел. Внутренние накладки изготовлены заодно со стойкой, которая заформована между несущими слоями трехслойной стенки лонжерона. На накладках и стойке фрезерованием образованы пирамидальные крепежные элементы.

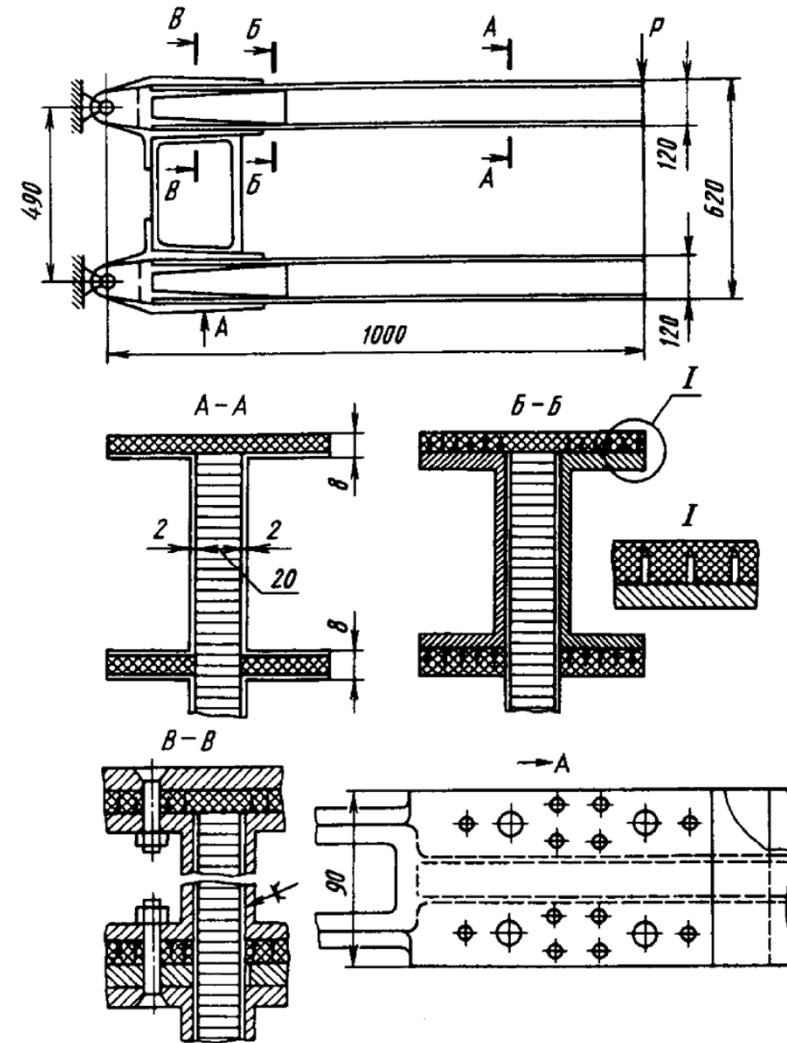


Примеры выполнения соединений высоконагруженных узлов и деталей



Конструкция нервюры элевона крыла из углепластика марки КМУ приведена на рисунке.

Нижний узел нервюры является осью вращения элевона, а к верхнему присоединяется управляющий (отклоняющий) силовозбудитель. Нервюра представляет собой два пояса двутаврового поперечного сечения, формируемые за одну технологическую операцию совместно с трехслойной общей стенкой с наполнителем типа ПСП (сотопласт).



Конструкторское решение фрагмента силовой нервюры элевона крыла из КМ

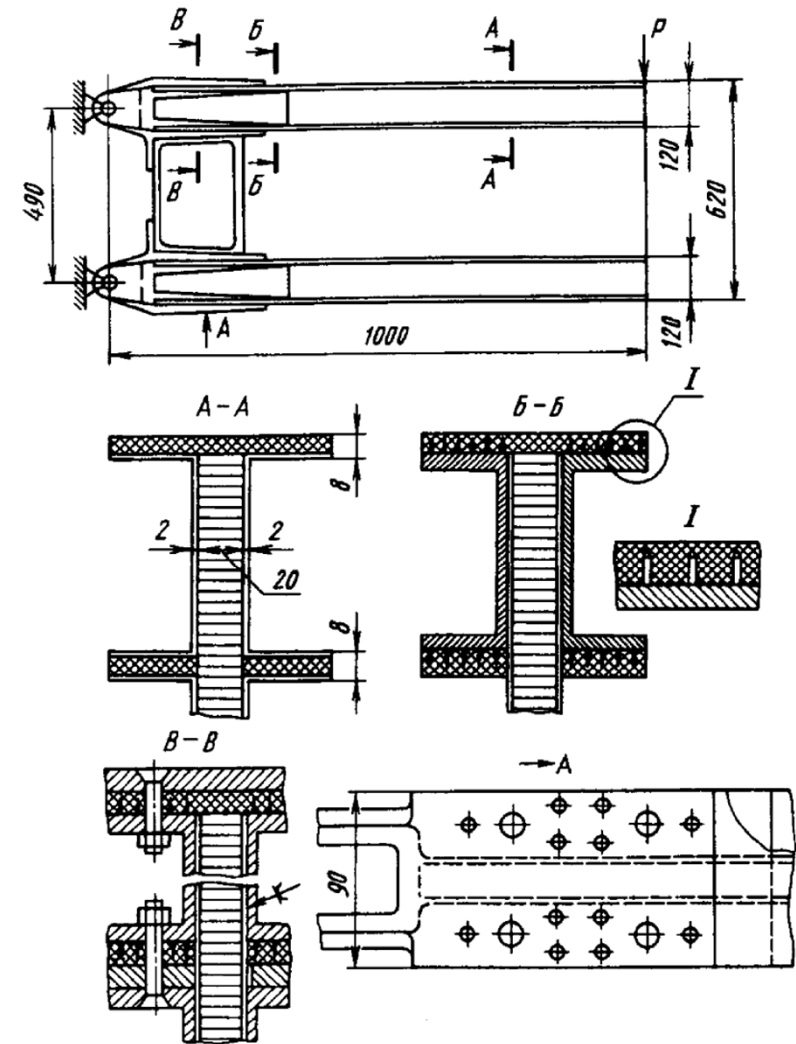


Примеры выполнения соединений высоконагруженных узлов и деталей



Стыковые вилки узлов образованы внутренними фитингами (4 шт.), имеющими приваренные крепежные элементы диаметром 1,5 мм и приформованными к полкам поясов при изготовлении нервюры.

После извлечения конструкции из оснастки и подготовки поверхности устанавливают на клее ВК-36 внешние охватывающие фитинги и дополнительно соединяются с внутренней композитной (или металлической) стойкой при помощи болтов диаметром 4...5 мм.



Конструкторское решение фрагмента силовой нервюры элерона крыла из КМ



6. Соединения трехслойных панелей



Одной из основных задач проектирования несущих кузовных конструкций, составленных из трехслойных панелей с легким наполнителем (пенопласты, соты), является конструктивное оформление соединений трехслойных элементов между собой и с другими элементами конструкции.

Выбор способа соединений трехслойных конструкций зависит от:

- требуемой прочности соединения;
- необходимого внешнего вида поверхности конструкции;
- простоты выполнения соединения.



Соединения трехслойных панелей



Трудность заключается в том, что трехслойные конструкции сравнительно плохо работают при воздействии сосредоточенных нагрузок. Поэтому, как правило, в местах приложения сосредоточенных сил трехслойные панели усиливаются.

Однако вследствие того, что во многих случаях на несущих трехслойных панелях приходится размещать большое количество разнообразных элементов насыщения, необходимость усиления всех мест крепления этих элементов приводит к неоправданному утяжелению кузова и снижению массовой эффективности применения трехслойных конструкций.

Следует тщательно выбирать размеры подкрепляющих элементов и, если возможно, устанавливать некоторые элементы на один несущий слой так, чтобы второй слой включался в работу через наполнитель.



Соединения трехслойных панелей



Для создания жесткого контура в торцевых сечениях трехслойных панелей можно устанавливать усиливающие элементы различной конструкции – законцовки.

Иногда законцовки выполняют роль элементов, герметизирующих полость заполнителя, предохраняющих от попадания в пространство между несущими слоями влаги, агрессивных газов, жидкостей и т. п. Зачастую они служат для передачи сосредоточенных нагрузок на панель.

Законцовки входят как составные элементы в узлы стыковки панелей. В случае если нагружение панели по контуру незначительно и не требуется обеспечения герметичности полости заполнителя, законцовку образуют путем установки в зоне, лежащей вблизи контура, более жесткого заполнителя или установкой дополнительных накладок на несущие слои.



Соединения трехслойных панелей



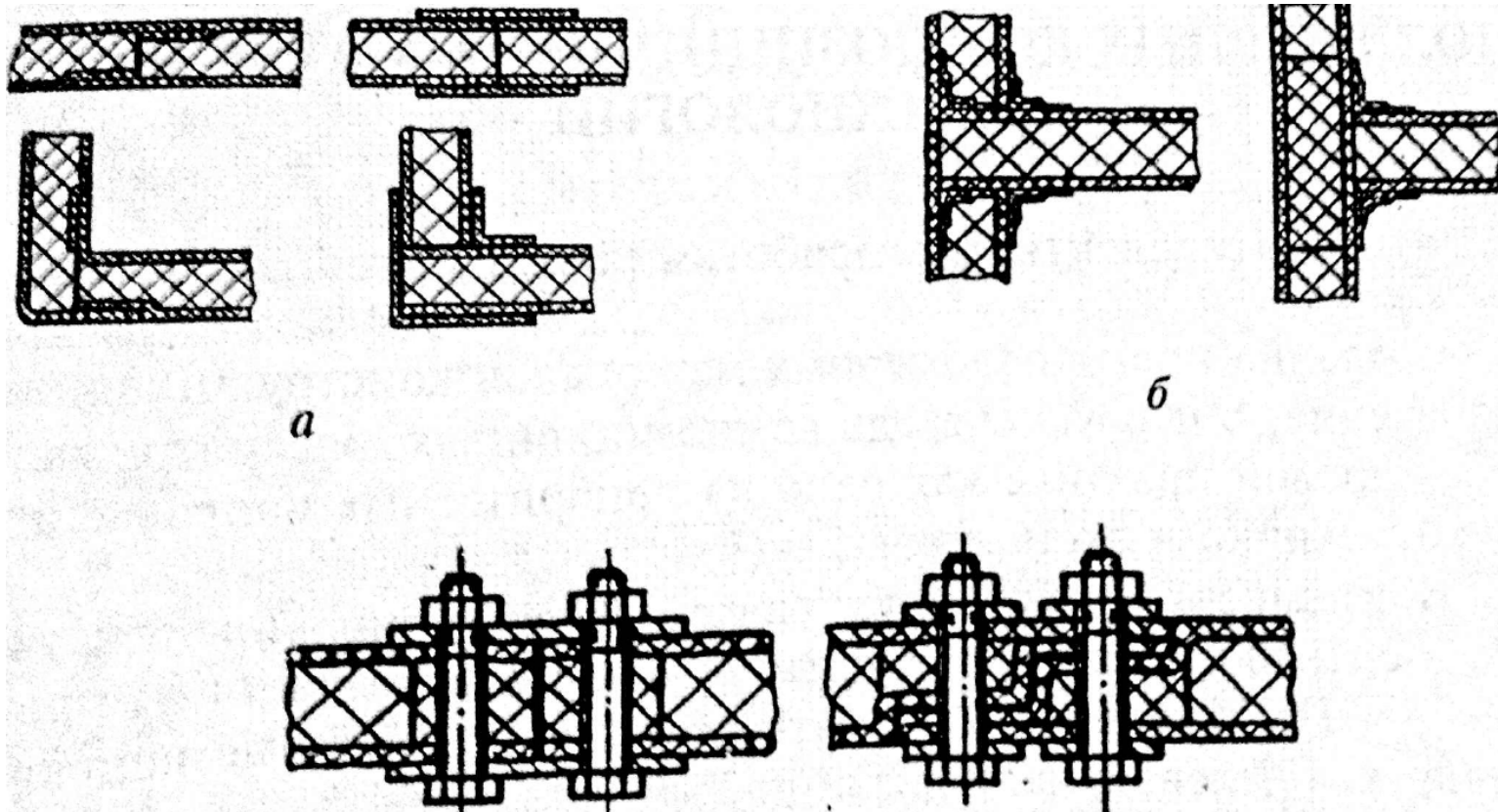
Различные виды соединений трехслойных панелей представлены на рисунке. Неразъемное соединение обычно осуществляют с помощью клея (рисунок а) или приформовыванием (рисунок б).

Если соединение оболочек трехслойных панелей производится нагревом и давлением, то в законцовках устанавливают жесткие вставки во избежание смятия сердцевины. Вставки между оболочками устанавливаются также в случае присоединения панели к одной из оболочек (см. рисунок б, правый) или в случае разъемного соединения с помощью болтов или шурупов. Под головки болтов и гаек в этом случае обязательно устанавливают металлические накладные или плоские шайбы (рисунок в).

Жесткие вставки могут быть использованы и непосредственно для соединения трехслойных панелей. При этом сами вставки-законцовки изготавливают из металла или пластмасс и приклеивают к оболочкам из ПКМ.



Соединения трехслойных панелей



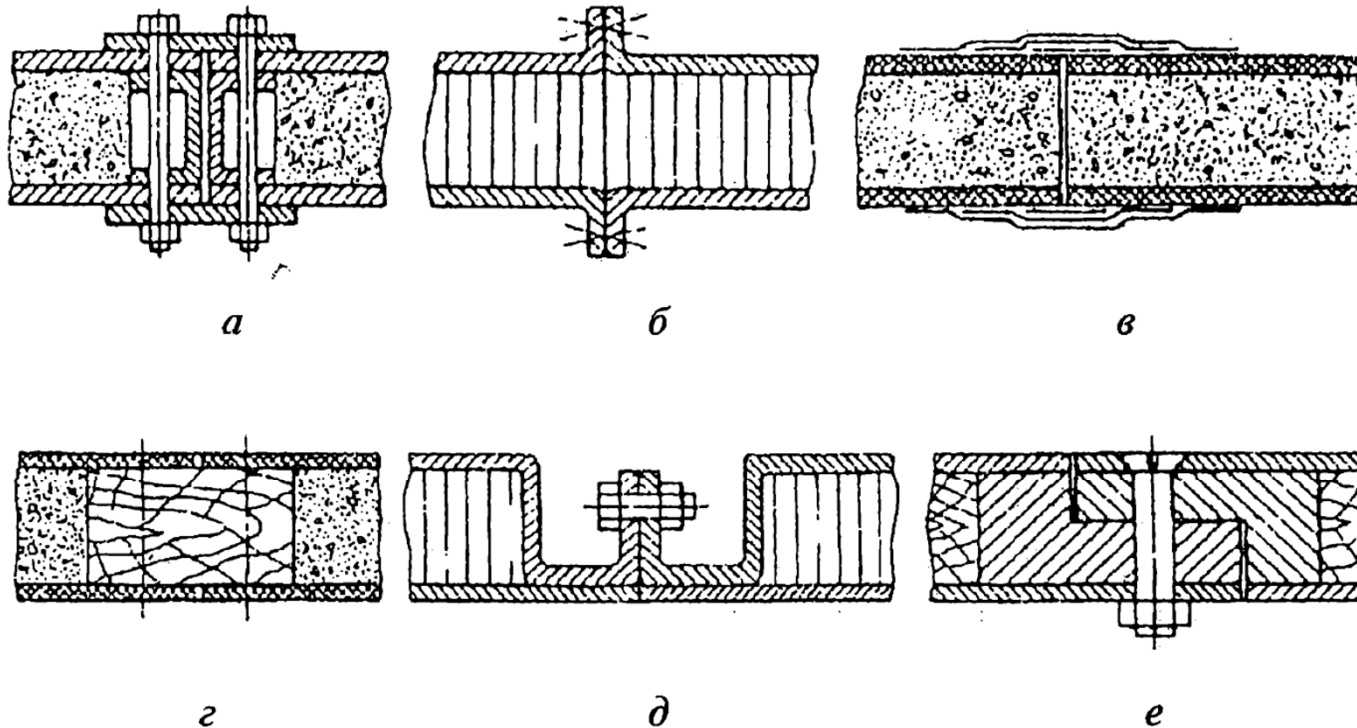
Соединения трехслойных конструкций из ПКМ: *а* – соединения трехслойных конструкций встык и под углом; *б* – Т-образные соединения трехслойных конструкций; *в* – механические соединения трехслойных конструкций.



Соединения трехслойных панелей



При соединении трехслойных панелей (см. рисунок) важное значение имеет оформление законцовок панелей (торцев).



Соединения трехслойных панелей:

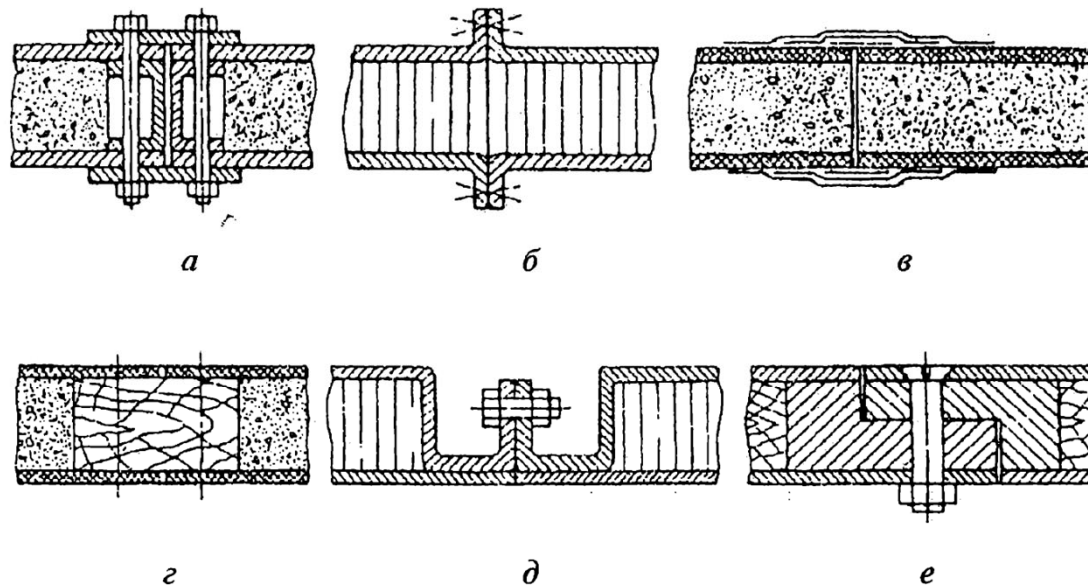
а – болтами с накладками; *б* – точечной сваркой; *в* – наформовыванием стеклопластика; *г* – шурупами или болтами; *д* – болтами встык; *е* – болтами без накладок



Соединения трехслойных панелей



Оформление законцовок панелей в первую очередь относится к разъемным соединениям (а, г, д, е), так как при затяжке резьбовых элементов возможно разрушение срединного слоя. Чтобы этого не происходило, нужно в торцы панелей устанавливать жесткие вставки из металлов или дерева. Это также необходимо в том случае, когда с помощью резьбовых элементов на трехслойную панель навешиваются какие-либо детали или агрегаты.



Соединения трехслойных панелей:

а – болтами с накладками; *б* – точечной сваркой; *в* – наформовыванием стеклопластика; *г* – шурупами или болтами; *д* – болтами встык; *е* – болтами без накладок



Заключение



В результате данной лекции были рассмотрены и проанализированы следующие вопросы:

- 1) основные типы и способы соединений, применяемых при сборке конструкций автомобиля;
- 2) преимущества и недостатки различных типов соединений и наиболее эффективные из них для конкретного случая;
- 3) технологию получения отверстий и гнезд в конструкциях из КМ для выполнения клепаных соединений;
- 4) конструкторско-технологические решения соединения обшивок из композита с металлическими и композитными силовыми элементами;
- 5) конструкторско-технологические решения соединения трехслойных панелей.



Контактная информация



E-mail:	kartashov@bmstu.ru
Рабочий телефон :	18-09
Мобильный телефон:	+7(926)275-0886

Спасибо за внимание!