

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»

Ю.А. ВАШУКОВ

ОСОБЕННОСТИ СБОРКИ ДЕТАЛЕЙ
ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
В КОНСТРУКЦИЯХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ
АППАРАТОВ

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия*

САМАРА
Издательство СГАУ
2007

УДК [621.744+621.778.2+621.792]: 624.016

ББК 34.432

В 234



Инновационная образовательная программа
"Развитие центра компетенции и подготовка
специалистов мирового уровня в области аэро-
космических и теоинформационных технологий"

Рецензенты: первый заместитель генерального директора, главный инженер
ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс», канд. техн. наук Н. П. Р о д и н;
канд. техн. наук, проф. А. И. З а б б а р о в

Вашуков Ю.А.

В 234 Особенности сборки деталей из композиционных материалов в кон-
струкциях летательных аппаратов: учеб. пособие / Ю.А. Вашуков. -
Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007.- 68 с. : ил.

ISBN 978-5-7883-0603-2

Рассмотрены вопросы проектирования и технологии выполнения меха-
нических точечных соединений конструкций из композиционных материалов. Дан
анализ факторов повышения несущей способности деталей из композиционных
материалов с отверстиями. Изложены особенности соединений элементов трех-
слойных конструкций. Учебное пособие предназначено для студентов аэрокосми-
ческих факультетов, обучающихся по специальностям 130100 «Самолето- и верто-
летостроение», 130600 «Ракетостроение», 130700 «Космические летательные ап-
параты и разгонные блоки».

Подготовлено на кафедре производства летательных аппаратов и управ-
ления качеством в машиностроении.

УДК [621.744+621.778.2+621.792]: 624.016

ББК 34.432

ISBN 978-5-7883-0603-2

© Вашуков Ю.А., 2007

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2007

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. КЛАССИФИКАЦИЯ СОЕДИНЕНИЙ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ	5
2. ЗАКЛЕПОЧНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ.....	9
2.1. Проектирование заклепочных соединений	9
2.2. Технология образования заклепочных соединений.....	13
3. БОЛТОВЫЕ СОЕДИНЕНИЯ	22
3.1. Проектирование болтовых соединений.....	22
3.2. Технология образования болтовых соединений	23
4. СШИВНЫЕ И ИГОЛЬЧАТЫЕ СОЕДИНЕНИЯ.....	31
5. КОМБИНИРОВАННЫЕ СОЕДИНЕНИЯ.....	33
6. АНАЛИЗ ФАКТОРОВ ПОВЫШЕНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ОТВЕРСТИЯМИ.....	35
6.1. Местное усиление материала армированием	35
6.2. Подкрепление стенок отверстий изделий из композиционных материалов элементами из однородных материалов	41
7. ОСОБЕННОСТИ СОЕДИНЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ТРЕХСЛОЙНЫХ КОНСТРУКЦИЙ.....	47
7.1. Существующие способы образования соединений трехслойных панелей с элементами конструкций.....	47
7.2. Исследование процесса постановки вкладыша в отверстие трехслойной конструкции путем запрессовки.....	50
7.3. Разработка оборудования и оснастки для осуществления технологических процессов постановки подкрепляющих элементов	57
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	62

ВВЕДЕНИЕ

Создание новых образцов авиационной и ракетно-космической техники с постоянно растущими требованиями к повышению эффективности, ресурса и надежности заставляет аэрокосмические державы разрабатывать новые материалы и технологические процессы, искать нетрадиционные конструктивные решения и методы проектирования.

Для авиационной техники наиболее перспективными считаются композиционные материалы (КМ), использование которых обеспечивает максимальный рост массово совершенства конструкций летательных аппаратов (ЛА) [1, 4, 11, 15]. Однако эффективность использования КМ в аэрокосмической технике во многом зависит от качества соединений. В первую очередь это связано с тем, что большинство разрушений конструкций из КМ происходит в зоне соединений (60...85%). При этом вес стыков часто составляет 20...30% от веса конструкции.

Трудности создания соединений и конструкций из КМ в основном вызваны несоответствием между механизмом передачи усилий в соединениях и механизмом включения в работу отдельных слоев элементов композиции. Соотношение между допустимыми напряжениями на срез, смятие и растяжение в соединениях из КМ не столь благоприятно, как в соединениях металлических конструкций [11, 25, 27]. Применение в соединениях КМ наиболее широко используемых стандартных механических точечных соединений не обеспечивает требуемой прочности. Из-за невысоких характеристик на смятие и срез может быть сведен на «нет» весь выигрыш в массе от применения в конструкции КМ. Наличие отверстий в конструкциях приводит к возникновению зон концентрации напряжений локального характера, играющих основную роль при определении несущей способности конструкций. В связи с этим для широкого промышленного использования традиционных соединений необходимо их всестороннее исследование, разработка новых конструкций с учетом специфики КМ, а также создание технологических процессов сборки элементов конструкций. Этим вопросам посвящена данная работа.

1. КЛАССИФИКАЦИЯ СОЕДИНЕНИЙ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

По характеру передачи нагрузок в ЛА соединения подразделяют на стыковочные и поддерживающие [5]. В стыковочных соединениях все нагрузки, приходящиеся на стык, воспринимаются металлическими элементами и передаются на корпус изделия через соединительный отсек, представляющий собой оболочку из КМ. Особенность поддерживающих соединений заключается в том, что нагрузка на стыке передается непосредственно адгезионными прослойками. Примером поддерживающих соединений служат соединения обшивки со стрингерным набором и обшивки с сотовым заполнителем.

Все виды соединений КМ условно можно классифицировать [5,11] по трем классам: 1) сплошные (клеевые формовочные, сварные); 2) механические (резьбовые, клепаные, шпилечно-болтовые, сшивные и игольчатые); 3) комбинированные (клесклепаные, клеесшивные, клееигольчатые, клееболтовые).

По механизму соединения *метод формовки* близок к склеиванию и нашел широкое применение при производстве крупногабаритных изделий из КМ. Используется он также для крепления различной металлической арматуры, оборудования и механизмов. Как правило, этот вид соединения применяется для толщин соединяемых материалов свыше 10 мм.

Сварные соединения предпочтительны в тех случаях, когда соединяемые детали изготовлены из одинаковых материалов и недопустимо присутствие чужеродных по отношению к применяемым материалам крепежных элементов или клеев. Она эффективна лишь при соединении реактопластов и термопластов с поперечными связями между молекулами.

Склеивание - один из наиболее распространенных способов соединений конструкций из КМ. Под ним понимают создание неразъемного соединения элементов конструкций с помощью клеевой прослойки без существенного изменения свойств материала в зоне шва. При склеивании в отличие от сварки между соединяемыми материалами и клеем сохраняется граница раздела. Прочность клеевого соединения обусловлена адгезионным взаимодействием соединяемых поверхностей с инородной клеевой прослойкой, пре-

имущественно полимерной природы, когезионной прочностью этой прослойки и прочностью соединяемых материалов. Конструктивно клеевые соединения выполняются внахлестку, встык с двумя накладками и со скосом кромок.

Достоинством этого способа является возможность соединения однородных и разнородных материалов, герметичность, хорошая вибропрочность и стойкость к распространению трещин, хорошая тепло-, звуко- и электроизоляция. С помощью склеивания можно соединять чувствительные к нагреву материалы, деформируемые или разрушаемые при сварке. Кроме того, данный способ позволяет создавать сложные изделия, с плавными обводами, без выступающих частей.

Несмотря на то, что клеевые соединения обладают рядом преимуществ, их нельзя применять для передачи сосредоточенных нагрузок в соединениях элементов, имеющих большую толщину (более 5 мм). Основное препятствие к применению этого способа - высокая жесткость соединяемых материалов. Эффективность его при прочих равных условиях падает с повышением жесткости и толщины соединяемых материалов (Рис. 1.1).

Из способов механических соединений деталей из КМ наибольшее распространение получили *заклепочные, болтовые и комбинированные соединения* [5, 11, 12, 25]. При выборе типа механического точечного соединения учитывают его эффективность при работе в условиях расслаивающих и отдирающих нагрузок, а также возможность контроля качества полученных соединений. Механические точечные соединения предпочитают другим способам соединения в следующих случаях: 1) при сборке изделий из деталей сравнительно больших сечений, если к ним приложены сосредоточенные нагрузки; 2) при необходимости обеспечить разъемность соединения; 3) при сборке деталей, изготовленных из материалов с различными физическими свойствами, когда невозможно осуществить сварку и трудно подобрать соответствующий клей; 4) при проведении монтажных работ для закрепления деталей и узлов насыщения на корпусных деталях. К преимуществам механических точечных соединений относят возможность обеспечения заданной прочности непосредственно после сборки, а также довольно низкие затраты на оборудование.

Все перечисленные выше соединения имеют специфические особенности, в силу чего каждый из них часто рассматривался отдельно, разными исследователями, специализировавшимися в достаточно узких областях. Данное обстоятельство привело к появлению различных подходов для оценки прочности соединений. Большинство же соединений в конкретных изделиях присуще общее функциональное назначение.

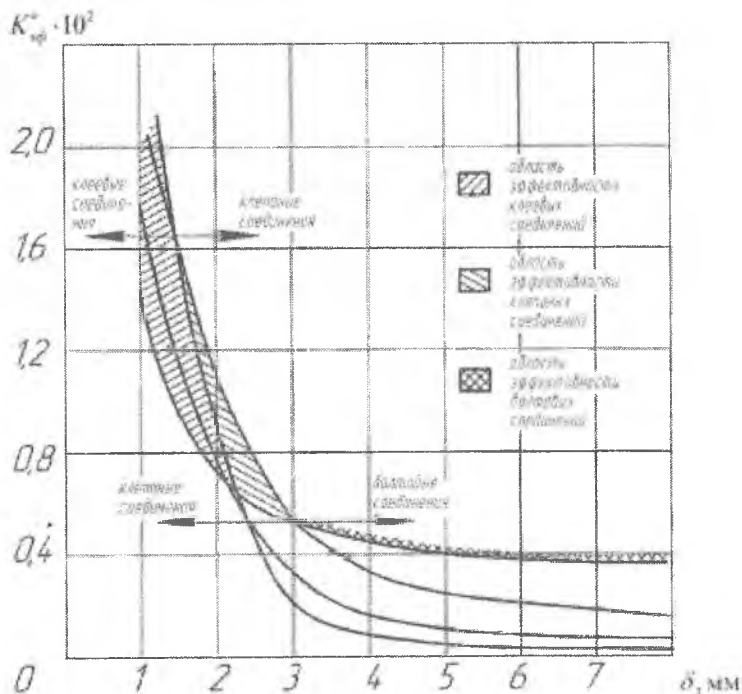


Рисунок 1.1. Сравнительная эффективность различных видов соединений: 1 — клеевых; 2 — клепаных; 3 — клепаных с односторонним доступом; 4 — болтовых

Производство новых летательных аппаратов (ЛА) требует постоянного совершенствования технологических процессов, разработки и внедрения новых методов и средств обработки, обеспечивающих постоянно растущие требования по качеству.

Сертификация - одна из наиболее эффективных форм обеспечения качества выпускаемых ЛА, а также их конкурентоспособности на внутреннем и внешнем рынках.

Решению вопросов сертификации большое внимание уделяют такие международные организации, как международная организация по стандартизации (ИСО), Международная электротехническая комиссия (МЭК), Всемирная торговая организация (ВТО). Сертификация сегодня рассматривается как средство, не только облегчающее производителю выход на рынки других стран, но и существенно повышающее его эффективность производства.

Летательные аппараты принадлежат к сложным техническим системам, отказы которых зачастую приводят к тяжелым последствиям. При этом формы и методы сертификации сложных изделий отличаются от традиционных подходов, применяемых при сертификации более простого оборудования. Особая роль сертификации сложных систем в обеспечении безопасности техники отражена в законах РФ «О техническом регулировании» и «О промышленной безопасности опасных производственных объектов». В связи с этим особенности сертификации ЛА должны быть предметом специального изучения, которому и будет способствовать данное учебное пособие.

2. ЗАКЛЕПОЧНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

2.1. Проектирование заклепочных соединений

Основной особенностью процесса образования заклепочных соединений деталей из КМ следует считать возможность разрушения композиции в процессе клепки [14, 31, 32]. При этом вероятность разрушения материала соединяемых деталей больше, чем при клепке металлов. После клепки в зоне шва появляются остаточные напряжения, которые влияют на работоспособность соединения.

Вид заклепочных соединений, их геометрические характеристики, материалы и тип крепежных элементов определяются конструктивными параметрами. Основными параметрами заклепочных соединений являются: диаметры силовых точек, размеры и вид соединяемых деталей, шаг между силовыми точками, расстояние от силовых точек до торцев, физико-механические характеристики материалов соединяемых деталей и элементов крепежа. Заклепки часто используются для соединения листов, полос, профилей и других аналогичных элементов конструкций. Прочность и надежность подобных соединений не изменяется в течение длительного времени. Заклепочные соединения типа «КМ-КМ» или «КМ-металл» применяются, как правило, в случае невозможности выполнения клеевых соединений по конструктивным и технологическим соображениям. Для изделий из угле- и стеклопластиков применение заклепочных соединений рационально при толщинах пластин до 5 мм. В работах [11, 12, 22] определены оптимальные соотношения диаметров заклепок к расстояниям между силовыми точками.

Большое влияние на несущую способность оказывают тип соединения (одно-двухсрезное и т.д) и характер внешнего нагружения. 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 (рис. 2.1). Соединения внахлестку и встык с накладками лучше работают на изгиб и сжатие, чем на растяжение. Соединения встык с двумя накладками используют при сборке элементов конструкции, передающих большие усилия и имеющих симметричную configura-

цию. В конструкциях с несимметричной конфигурацией при растяжении возникает изгибающий момент, действующий на крепеж, в результате чего происходит неравномерное распределение напряжений по толщине деталей. Поэтому при конструировании изделий несимметричной конфигурации необходимо исключить возможность работы заклепочного соединения на растяжение. Если это невозможно, то допустимое напряжение заклепки должно быть равно половине допустимого напряжения заклепки, работающей на чистый срез.

При соединении пластин из КМ тип заклепок оказывает [25] большее влияние на несущую способность, чем при клепке металлических листов. Например, соединение элементов конструкций из угле- и стеклопластиков с применением заклепок с полукруглыми и плоскими головками разрушается при больших нагрузках, чем соединение заклепками с потайными головками. Для соединения деталей из углепластиков увеличение угла закладной головки заклепок приводит к повышению прочности. Применяемые заклепки нормализованы и имеют шифр, указывающий форму закладной головки, марку материала, диаметр и длину стержня. Наиболее распространена плоская замыкающая головка. Если длина стержня под замыкающую головку равна его диаметру, то не происходит слишком сильного расклепывания замыкающей головки и можно избежать больших сжимающих напряжений, действующих на композит. Разброс значений толщины деталей из КМ вдоль заклепочного шва оказывает большое влияние на процесс клепки и прочность соединения. Длина стержня заклепки должна назначаться применительно к номинальной толщине детали из КМ. При толщине детали больше номинальной образуется неполная головка, а при толщине детали меньше номинальной - увеличенная, что вызывает перенапряжение композита. Поэтому при конструировании ответственных соединений необходимо либо установить допуски на толщину композита, либо сохранить постоянную длину стержня заклепки под замыкающую головку.

В соединениях «КМ-металл» замыкающую головку оформляют со стороны детали, выполненной из более прочного и твердого материала. При соединении листов различной толщины потайные головки заклепок располагают со стороны листа большей толщины, а выступающие - со стороны более тонкого листа.

Основной задачей при конструировании заклепочного соединения является правильный выбор его размеров при заданной толщине склепываемых деталей.

Если соединение будет равнопрочным независимо от характера разрушения, а ослабление по сравнению с основным материалом наименьшим, то можно считать, что соотношения между указанными параметрами выбрано правильно.

При растяжении многорядных соединений могут произойти [23] следующие разрушения механических соединений:

1. По сечению, ослабленному заклепочными или болтовыми отверстиями, когда напряжения в основном материале достигнут предела прочности при растяжении. Причем вследствие хрупкости материала лимитирующими будут местные растяжения, возникшие из-за резкого ослабления рабочего сечения заклепочными отверстиями. Эти максимальные напряжения (рис. 2.2) зависят от формы отверстия, ослабляющего сечения, и от отношения d/b :

$$\sigma_{\max} = \sigma \alpha_k, \quad (2.1)$$

где α_k - теоретический коэффициент концентрации напряжений, зависящий от формы отверстия и отношения d/b ; выбирается по графикам.

В этом случае разрывное усилие может быть определено по зависимости:

$$P_{1 \text{ разр}} = \frac{\sigma_{\text{в.разр}}}{\alpha_k} (F - f_{\text{осл}}), \quad (2.2)$$

где F - площадь поперечного сечения соединений;

$f_{\text{осл}}$ - суммарная площадь сечения, ослабленного отверстиями.

2. По сечениям, параллельным растягивающему усилию и проходящим через центры заклепочных отверстий, когда напряжения в этих сечениях достигнут предела прочности при сдвиге. В этом случае разрывное усилие может быть определено по формуле:

$$P_{2 \text{ разр}} = \tau_{\text{в.сд}} d \delta n, \quad (2.3)$$

где d - расстояние от края заклепочного отверстия до кромки листа в однорядных соединениях или расстояние между ближайшими стенками заклепочных отверстий в двухрядных соединениях;

δ - толщина листов;

n – число работающих заклепок.

3. По сечениям, параллельным растягивающему усилию и проходящим через центры заклепочных отверстий, когда напряжения в этих сечениях достигнут предела прочности при сдвиге. В этом случае разрывное усилие может быть определено по формуле:

$$P_{2 \text{ разр}} = \tau_{\text{в.сд}} d \delta n, \quad (1.4)$$

где d – расстояние от края заклепочного отверстия до кромки листа в однорядных соединениях или расстояние между ближайшими стенками заклепочных отверстий в двухрядных соединениях;

δ – толщина листов;

n – число работающих заклепок.

4. Разрушение материала нагруженных стенок заклепочных отверстий, когда напряжения в этих местах достигнут предела прочности при сжатии или временного сопротивления смятию.

Разрушающую нагрузку в этих случаях можно определить по формулам:

$$P_{3 \text{ разр}} = \sigma_{\text{в.сж}} d \delta n, \quad (1.5)$$

$$P_{4 \text{ разр}} = \sigma_{\text{в.см}} d \delta n, \quad (1.6)$$

5. По заклепкам – при нагрузках на срез или смятие. В этом случае разрушающая нагрузка составит:

$$P_{5 \text{ разр}} = \tau_{\text{в.ср}} \frac{\pi d^2}{4} n m, \quad (1.7)$$

где m – число плоскостей среза,

$$P_{6 \text{ разр}} = \sigma_{\text{см}} d \delta n. \quad (1.8)$$

При теоретически правильном выборе оптимальных элементов соединения его разрушение должно произойти по всем указанным выше сечениям одновременно. В связи с этим при подсчете разрушающих нагрузок их значения, определяемые по формулам (1.2 - 1.8), должны быть одинаковыми.



Рисунок 2.1. Виды клепаных швов: а – внахлестку; б – встык с одной накладкой; в – встык с двумя накладками; г – стрингерные

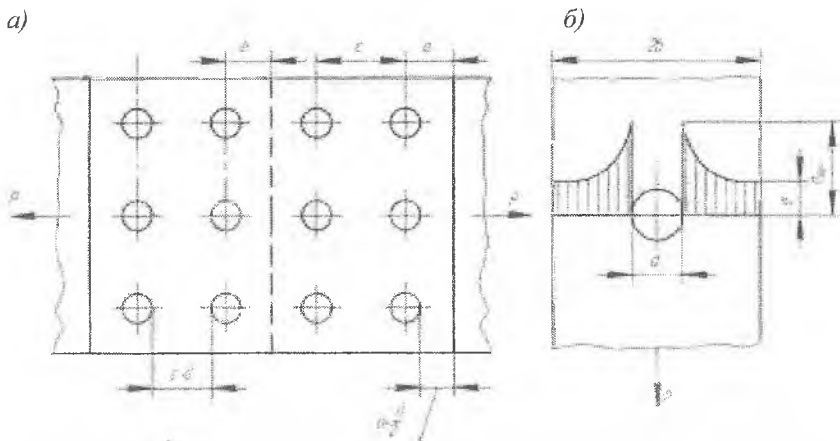


Рисунок 2.2. Элементы механического соединения (а) и схемы нагружения (б)

2.2. Технология образования заклепочных соединений

Технологические параметры и факторы определяют порядок сборки соединений, требования к необходимому оборудованию и оснастке, форме и качеству обработки поверхностей, состоянию поверхностей головок, плотности их прилегания к поверхностям гнезд (для заклепок с потайными головками), натяг заклепок и болтов, усилие затяжки, точность и взаимосвязь элементов, качество образования отверстий и резьб, усадочные напряжения в КМ. Выбор способа и условий образования заклепочных соединений зависит от типа крепежа, конструктивных особенностей изделия, свойств соединяемых материалов и специфики производства.

По характеру деформирования стержня клепку подразделяют на ударную, прессовую и клепку раскатыванием [1, 12, 22, 27].

Ударную клепку выполняют преимущественно пневматическими клепальными молотками, выбираемыми в зависимости от диаметра и материала заклепки. В зависимости от расположения клепального молотка по отношению к замыкающей головке ее можно выполнять прямым или обратным способами.

При клепке прямым способом удары молотка наносят со стороны замыкающей головки, при этом поддержка находится со стороны закладной головки. Такой способ клепки предпочтителен при

постановке потайных заклепок, так как в случае клепки этих заклепок обратным методом при малейшем отклонении обжимки молотка на поверхности композита образуется вмятина или царапина.

При клепке обратным способом поддержка располагается со стороны замыкающей головки, что облегчает контроль процесса ее образования, кроме того, при работе молотком со стороны закладной головки предотвращается соскальзывание обжимки на композит. Все это существенно снижает напряжения в материале деталей и почти полностью исключает повреждение композита в зоне отверстия.

Прессовая клепка обладает рядом преимуществ по сравнению с ударной клепкой: облегчаются условия труда, появляется возможность частично механизировать процесс и исключить вибрацию и шум, а также повреждения поверхности композита, обеспечивается высокая прочность и стабильность свойств швов по длине, создаются условия организации поточной сборки, следовательно, повышается производительность труда при сборке.

Прессовую клепку производят на стационарных прессах для групповой или одиночной клепки или с помощью переносных клепальных прессов. Тип пресса выбирают с учетом формы и размеров собираемого изделия, а также усилий, необходимых для образования замыкающих головок.

Недостатком клепки прессовым способом является значительная деформация стержня в зоне отверстия. При этом может произойти разрушение материала соединяемых деталей, а при клепке тонкостенных деталей - его выпучивание; кроме того, этим методом нельзя создать подвижные шарнирные соединения. Можно несколько облегчить клепку, проводя ее в два приема.

Для снижения деформации КМ при клепке используют [11, 14] метод клепки давлением с раскаткой. В настоящее время разработаны два способа клепки давлением с раскаткой: круговой и радиальный.

При круговой схеме перемещения инструмента ось инструмента описывает в пространстве поверхность кругового конуса с вершиной в точке А (рис. 2.3 а), лежащей на оси вращения шпинделя. Вращение инструмента вокруг своей оси отсутствует. Данная схема движения инструмента исключает возникновение сил трения в зоне контакта инструмента с заклепкой. При движении инстру-

мента по круговой схеме контакт инструмента с торцем стержня заклепки теоретически осуществляется по линии, практически же – по некоторому сектору, центральный угол которого определяется режимами клепки (осевая сила, подача и скорость вращения шпинделя), углом наклона инструмента и механическими свойствами деформируемого материала. Такая схема перемещения инструмента способствует тому, что материал заклепки смещается в радиальном направлении, при этом глубина деформируемого слоя стержня за один проход инструмента невелика. В результате этого боковая поверхность выступающей части стержня заклепки представляет собой поверхность, близкую к конической (рис. 2.3 б), в отличие от прессовой клепки, при которой выступающая часть стержня принимает бочкообразную форму. Создание при этом напряжений, превышающих предел текучести в деформируемом материале, обеспечивается малой площадью контакта рабочей поверхности инструмента с поверхностью стержня заклепки, что приводит к снижению усилий осадки и благоприятному заполнению лунки под потайную замыкающую головку.

При радиальной клепке затрачивается усилия на 10-20% меньше, чем при круговой клепке. При этом обеспечивается более высокое качество соединения. Продолжительность клепки в зависимости от размера и формы головки составляет 0,5-2,0 с. Такую клепку можно применять для хрупких, тонких и слоистых материалов, а также для образования замыкающих головок у мелких заклепок.

Заклепки по конструктивно-технологическому признаку можно разделить на две группы: заклепки, для постановки которых необходим подход к конструкции с двух сторон - со стороны закладной и замыкающей головок, и заклепки, для постановки которых достаточно обеспечить подход к конструкции с одной стороны - со стороны закладной головки.

Заклепки первой группы имеют преимущественно монолитный или полупустотелый стержень. Постановка полупустотелых заклепок заключается в развальцовывании выступающего над поверхностью детали трубчатого конца заклепки. При этом наиболее перспективным и опробованным методом образования клепаных соединений пакетов из КМ и смешанных является гидродинамическая клепка (рис. 2.4), в которой используются полупустотелые за-

клепки, плотно или с небольшим натягом устанавливаемые в пакет, и металлические шайбы, также с натягом устанавливаемые на стержень заклепки [1]. В полость заклепки набивается вязкая среда (рис. 2.4 а). В результате с помощью обжимки специальной формы на 1-м переходе легко осуществляется раздача верхнего конца стержня с полостью, не вызывая раздачу заклепки по длине ее тела, размещенного внутри пакета. При 2-м переходе обжимкой с плоским торцом окончательно формируется замыкающая головка заклепки (рис. 2.4 б). Гидродинамический процесс клепки позволяет производить соединение пакетов из различных КМ толщиной до 10 мм, при диаметре 3...6 мм заклепками из материала Д18, В65. При этом запасаемая энергия магнитно-импульсной установки (МИУ) составляет до 5... 10 кДж.

Клепка с прошивкой стержня заклепки позволяет отказаться от предварительно доработанной полупустотелой заклепки и использовать нормализованную стержневую заклепку. Это исключает трудоемкую операцию сверления заклепки с применением специальной оснастки. Испытания показали, что для осуществления клепки пакетов из КМ толщиной 2-5 мм алюминиевыми заклепками диаметром 4 мм может быть использован прошивной инструмент диаметром $d=2-3$ мм, при глубине прошивки, равной $h = (0,5 - 0,7)d$. Эти параметры процесса обеспечивают незначительные силы расклепывания и радиальные натяги, что предохраняет от разрушения кромку отверстия пакета из КМ и повышает качество заклепочного соединения.

Применение технологической разъемной шайбы, выполняющей роль буфера для проникновения возникающих деформаций внутрь пакета и снижающей натяг, позволяет снизить массу соединения и материалоемкость, вследствие того, что шайба съёмная и ее можно многократно использовать при клепке. Схема процесса клепки с технологической шайбой показана на рис. 2.5. После установки заклепки 2 в отверстие пакета 1 склепываемых деталей из КМ на стержень заклепки, выступающей из пакета, устанавливают технологическую разъемную шайбу 3 (рис. 2.5 а). Затем производят сжатие пакета прижимом 4 и плунжером 5. Далее предварительно осаживают стержень заклепки конусным пуансоном 6 (рис. 2.5 б). После чего технологическую шайбу удаляют из рабочей зоны и осуществляют окончательную осадку замыкающей головки 8 за-

клепки специальной обжимкой 7 (рис. 2.5 в, г). Пуансон рекомендуется выполнять с углом конусности $\alpha=150^\circ$, разъемную шайбу с углом конусности внутренней поверхности основания $\beta=170^\circ$ (данные углы конусности обеспечивают наименьшую силу осаживания и установлены экспериментально).

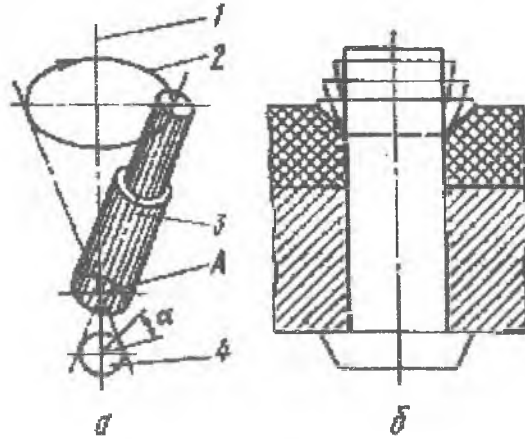


Рисунок 2.3. Схема процесса образования замыкающих головок при клепке давлением с раскаткой: а – движение инструмента; 1 – ось вращения шпинделя; 2 – траектория движения; 3 – ось инструмента; 4 – торец заклепки; б – этапы изменения формы головок

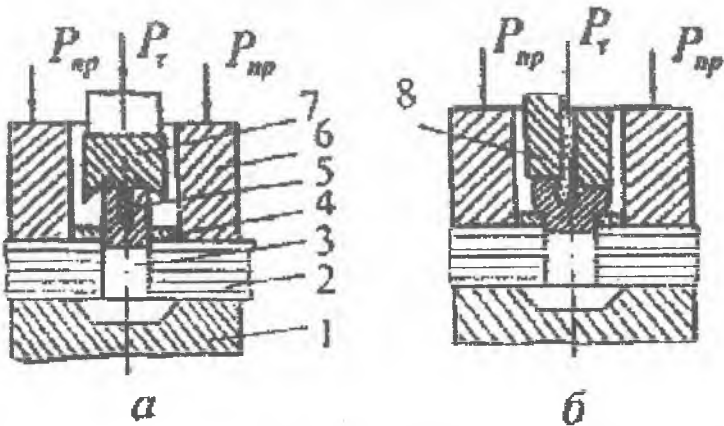


Рисунок 2.4. Двухпереходная гидродинамическая клепка из КМ и смешанных пакетов: а – 1-ый переход: 1 – поддержка; 2 – пакет; 3 – стержень полупустотелой заклепки; 4 – кольцо-шайба; 5 – жидкость в полости заклепки; 6 – прижим; 7 – обжимка; б – 2-ой переход: 8 – обжимка второго перехода

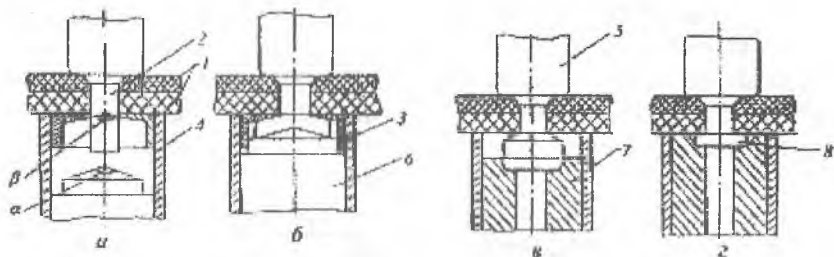


Рисунок 2.5. Схема клепки с технологической шайбой: а, б, в, г – стадии клепки

Заклепки второй группы имеют преимущественно пустотелый стержень. Обычно для получения такого крепежного элемента выбирается гайка-пистон по отраслевым нормам в зависимости от толщины КМ и диаметра пробиваемого отверстия. Прочность такого крепежного элемента на бороалюминиевой композиции зависит от разрушения волокон в зоне отверстия, толщины КМ и диаметра закладной и замыкающей головки.

При постановке гайки-пистона на бороалюминий толщиной 0,5-0,8 мм для увеличения статической нагрузки, воспринимаемой крепежным элементом, необходимо установить дополнительно две шайбы со стороны закладной и замыкающей головки заклепки. Это позволяет на порядок увеличить нагрузку, воспринимаемую крепежным элементом. В процессе используется метод получения отверстия в склепываемом пакете пробивкой торцом стержня заклепки с одновременной ее установкой в отверстии и запрессовкой в кольцо-матрицу.

На рис. 2.6. показаны стадии процесса постановки гайки-пистона двумя шайбами на профиль из бороалюминия. Профиль из бороалюминия 3 устанавливают на верхнюю линейку 1 оснастки для пробивки и прижимают направляющей планкой 5 с силой P (рис. 2.6 а). В направляющем отверстии линейки 5 устанавливают шайбу 4 совместно с гайкой-пистоном 6 и соосно с ними со стороны замыкающей головки, т.е. внутренней стороны профиля, располагают шайбу-матрицу 2, размещенную в гнезде верхней линейки 1. На головку гайки-пистона 6 воздействуют силой $P_{пр}$, которая обеспечивает перемещение гайки-пистона, пробивку отверстия в профиле с торцом стержня с одновременной установкой гайки-пистона в этом отверстии и запрессовки ее

в шайбе-матрице 2 (рис. 2.6 б).

При этом шайба 4 играет роль направляющей для гайки-пистона. Затем оснастка для пробивки удаляется, ввертывается в гайку-пистон 6, наконечник 9 и устанавливается инструмент 8 для формообразования замыкающей головки (рис. 2.6 в). Замыкающая головка получается при приложении текущей силой P_1 к наконечнику 9 при одновременном прижиге инструмента 8 с силой P_2 к закладной головке (рис. 2.6 г). После формообразования замыкающей головки наконечник 9 вывертывается и снимается инструмент (рис. 2.6 д). Резьба при этом сохраняется, и ее можно применять для крепления хомутика 11 с кабелем 12 винтом 10 (рис. 2.6 г).

Установленные шайбы позволяют на порядок повысить статическую прочность такого крепежного элемента, как в направлении нагрузки внутрь профиля, так и на отрыв во внешнюю сторону.

При увеличении толщины стенки профиля до 1,0...3,0 мм получить отверстие пробивкой горцем гайки-пистона невозможно. Для этого случая разработан способ постановки крепежного элемента пробивкой отверстия специальным пробойником.

На рис. 2.7 показаны стадии процесса постановки крепежного элемента, состоящего из гайки-пистона и шайбы на профиле из бореалюминия.

Разработанный технологический процесс заключается в том, что предварительно в гайку-пистон 2 (рис. 2.7 а) устанавливают наконечник 3, на который навинчивают со стороны замыкающей головки пробойник 1, диаметром равным диаметру гайки-пистона, а со стороны закладной головки навинчивают направляющую шайбу 4. Собранный элемент устанавливают в направляющую втулку 5 на пробивной оснастке и соосно с ним со стороны замыкающей головки, т.е. внутренней стороны профиля 6, располагают шайбу-матрицу 7, размещенную в гнезде верхней линейки 8 (рис. 2.7 б).

Верхнюю стенку профиля 6 прижимают направляющей 5 с силой P_1 , а затем на направляющую шайбу 4 воздействуют силой P_2 . Происходит процесс пробивки отверстия в КМ пробойником 1 с одновременной установкой гайки-пистона в этом отверстии и запрессовки ее в шайбе-матрице 7 (рис. 2.7 в).

Затем оснастку для пробивки отверстий удаляют и устанавливают инструмент 10 для формообразования замыкающей головки. Она образуется при приложении тянущей силы P_3 к наконечнику 3

при одновременном прижиге инструмента 10 с усилием P_2 к закладной головке (рис. 2.7 г). В процессе формообразования замыкающей головки гайки-пистона 2 играет большую роль пробойник 1 (рис. 2.7 д), так как в этом случае сила формообразования передается гайке-пистону 2 не по резьбе, а по торцу, что способствует сохранению резьбы на гайке-пистоне и лучшему формообразованию замыкающей головки.

После окончания процесса вывертывается наконечник 3 и пробойник 1. Резьба на гайке-пистоне сохраняется, и крепежный элемент (рис. 2.7 е) можно использовать для крепления деталей к профилю с помощью винтов.

Установленная шайба 7 позволяет повысить статическую прочность крепежного элемента на отрыв во внешнюю сторону профиля. Таким же способом можно получать крепежный элемент на профилях из бореалюминия с двумя шайбами. Пробойник изготавливают из стали У10А, толщиной 4-5 мм, диаметром равным диаметру стержня гайки-пистона. Он может быть использован для пробивки 1000...1500 отверстий в профилях из бореалюминия толщиной 1,5...3,0 мм.

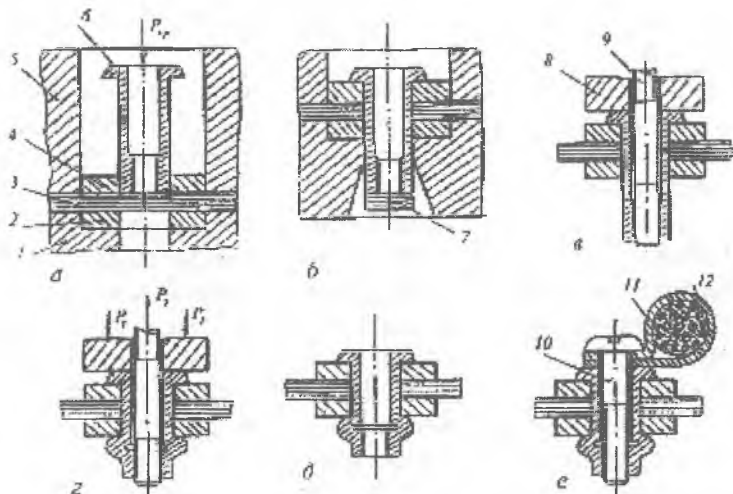


Рисунок 2.6. Процесс образования соединения заклепками типа гайка-пистон:

1 – верхняя линейка; 2 – шайба-матрица; 3 – профиль; 4 – шайба; 5 – направляющая линейка; 6 – гайка-пистон; 7 – отход; 8 – инструмент; 9 – наконечник; 10 – винт; 11 – хомут; 12 – кабель

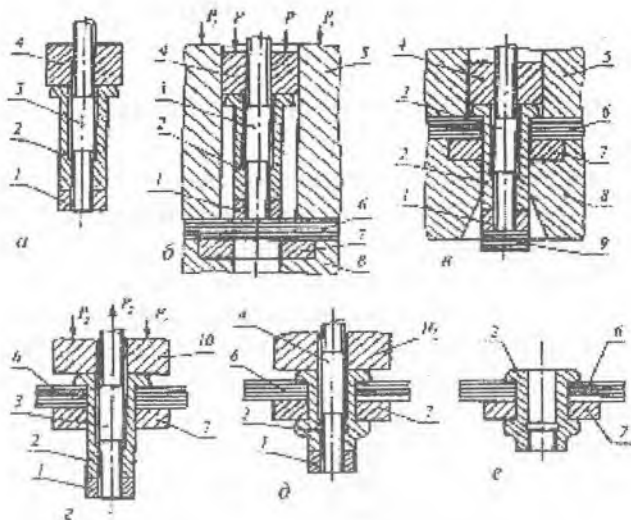


Рисунок 2.7. Способ постановки крепежного элемента пробивкой отверстия специальным пробойником.

- 1 – пробойник; 2 – гайка-пистон; 3 – наконечник; 4 – направляющая шайба;
 5 – направляющая втулка; 6 – профиль; 7 – шайба-матрица;
 8 – верхняя линейка; 9 – отход; 10 - инструмент

3. БОЛТОВЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

3.1. Проектирование болтовых соединений

Соединение болтами применяют для деталей с толщиной стенок более 4-6 мм, а также для деталей, которые нуждаются в периодической замене или частом ремонте. Болтовые соединения хорошо выдерживают статические нагрузки. Они могут быть использованы также в конструкциях, испытывающих динамические нагрузки, если есть возможность предотвратить самоотвинчивание гаек. Болтовые соединения вместо винтовых используют в тех случаях, когда требуются большие стягивающие усилия и при этом в деталях допускаются сквозные отверстия.

Надежная работа болтовых соединений зависит от правильности выбора крепежных элементов, конструкции соединения, точности расчета усилия предварительной затяжки и его обеспечения при сборке, а также от правильности учета рабочих нагрузок.

Диаметр болта можно выбирать исходя из условия равнопрочности при срезе болта и разрыве композита. Необходимо выбирать минимально возможное значение диаметра болта. Чем меньше диаметр болта, тем больше крепежных элементов, следовательно, больше объем материала, воспринимающего напряжение.

Одновременно с выбором диаметра болта определяют диаметр отверстия под крепеж. Зазор между стержнем болта и стенкой отверстия зависит от номинального диаметра болта; он не должен превышать $(0,015-0,02) d$. Болты не рекомендуется устанавливать в отверстие с натягом.

Для крепления изделий из полимерных КМ применяют стандартные болты из углеродистой стали, а для тяжело нагруженных соединений КМ – болты из легированной стали (например, марки 30ХГСА). Для повышения коррозионной стойкости стальной крепеж иногда покрывают кадмием, цинком, никелем или хромом.

Титановые сплавы благодаря их низкой плотности, высокой прочности на срез, а также коррозионной стойкости к агрессивным средам широко используют для изготовления крепежа, применяемого в ЛА. В баллистических ракетах и космических аппаратах применяют бериллиевый крепеж.

Для облегчения конструкций применяют полые болты [14] диаметром 6-50 мм, у которых при этой же массе, что и у монолитных болтов, площадь, работающая на смятие, больше.

Детали из КМ соединяют с помощью болтов аналогично соединению деталей заклепками (рис. 2.1). Кроме того, болтовые соединения применяют во фланцевых узлах. При этом особенностью такого 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 (рис. 3.1).

Болтовые соединения листовых материалов рассчитывают подобно заклепочным соединениям. Для обеспечения равномерного распределения эксплуатационных нагрузок необходимо, чтобы отношение диаметра болта к толщине листа КМ было не менее единицы.

Для того, чтобы предотвратить смятие материала под головками болтов и под гайками при их затяжке и обеспечить распределение рабочих нагрузок на больший объем материала, под гайки и головки болтов подкладывают общие индивидуальные шайбы.

3.2. Технология образования болтовых соединений

В общем случае процесс выполнения болтового соединения в листовых деталях из ПКМ включает в себя операции образования путем сверления или пробивки отверстия, постановки болта, навинчивания гайки заданным крутящим моментом. Технологические факторы определяют точность и качество отверстий под крепежный элемент, остаточные напряжения, возникающие в процессе образования соединения, а также усилие затяжки болтов.

Важным критерием качества отверстия при его получении является величина износа сверла [28]. Предельный износ сверл регламентируется качеством поверхности отверстия и стойкостью инструмента. Влияние изнашивания сверл на долговечность соединения показано на рис. 3.2, из которого следует, что с увеличением износа сверла долговечность соединения снижается. Технологические особенности получения отверстий в деталях и узлах ЛА, выполненных из КМ, подробно рассмотрены в работах [6, 8, 28].

Для механических точечных соединений характерно повышение коэффициента концентрации напряжений (ККН) с увеличением натяга [11, 14, 17, 31, 32] (рис. 3.3). Кроме того, увеличение натяга снижает [8, 11] выносливость соединения (рис. 3.4). Снижение долговечности происходит и в результате увеличения зазора между крепежным элементом и стенкой отверстия (рис. 3.5).

Наиболее эффективным фактором, влияющим на несущую способность болтового соединения, является применение осевой затяжки. Экспериментальные исследования, проведенные в работе [21] на материале КМУ с варьированием величины усилия затяжки и направления вырезки образцов показали, что прочность болтового соединения, затянутого до 40 Нм, увеличивается в 1,5 - 2,0 раза по сравнению с незатянутым болтовым соединением. Данные, полученные в работах [21, 29], указывают на то, что увеличение усилия затяжки болта приводит к увеличению долговечности соединения (рис. 3.4).

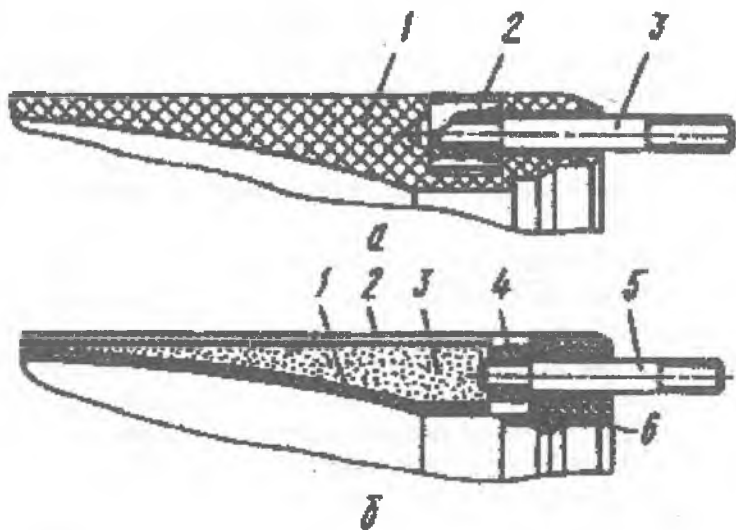


Рисунок 3.1 Разъемные фланцевые стыки:

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)

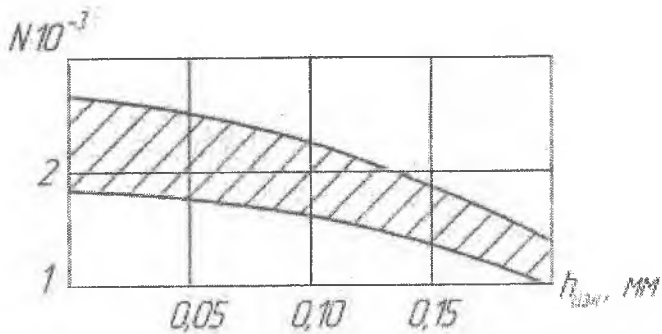


Рисунок 3.2 Влияние износа сверл на долговечность механических точечных соединений

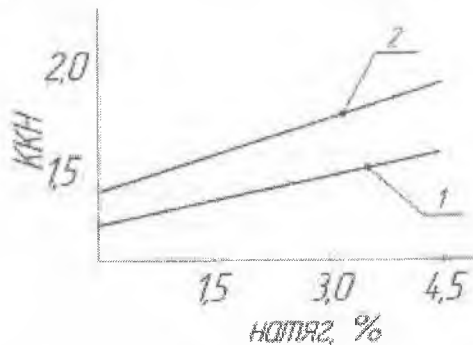


Рисунок 3.3 Зависимость ККН для стеклотекстолитов ВФТ-С (1) и КАСТ-В (2) от натяга, возникающего при постановке механических точечных соединений

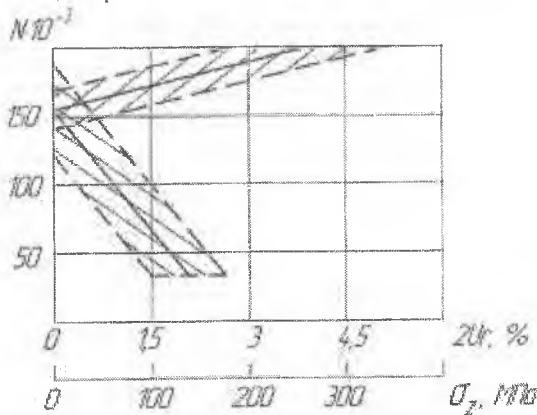


Рисунок 3.4 Влияние натяга и затяжки болтовых соединений на их выносливость: 1 – натяг болта; 2 – затяжка болта

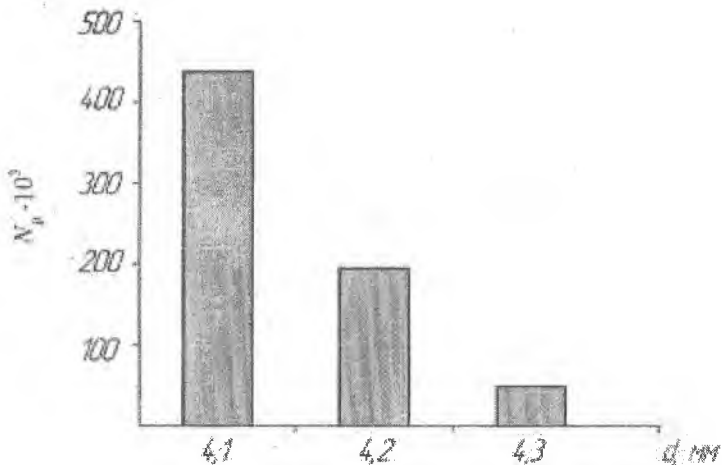


Рисунок 3.5. Влияние зазора между крепежным элементом и стенкой отверстия на выносливость соединения

С целью проверки возможности улучшения качества болтового соединения в работе [21] под гайку устанавливали шайбу или механическую прокладку различной толщины, формы и размеров и осуществляли предварительную затяжку тарированным ключом. Проведенные испытания показали, что прочность соединения с предварительной затяжкой зависит от жесткости прокладки, диаметра болта, величины момента закручивания. Как указывается в работе, прокладки с низкой жесткостью при затяжке болтового соединения прогибаются, уплотняя КМУ вокруг отверстия, в результате чего разрушение пластины происходит за пределами области уплотнения при несколько повышенных значениях нагрузок. Это объясняется тем, что давление от затяжки болта создаст дополнительную силу трения, препятствующую проскальзыванию полос относительно друг друга. Экспериментально установлено, что прочность болтового соединения с предварительной затяжкой состоит из трех составляющих: собственно прочности композиционной пластины с отверстием; силы трения между пластинами, возникающей при создании предварительной затяжки и дополнительной силы сопротивления разрушению композиционной пластины, находящейся в условиях сжатого состояния между жесткой прокладкой и металлической пластиной. При этом величина силы трения составляет 30-34% общей прочности соединения. Исходя из

общей прочности соединения, было выявлено, что прочность композиционной пластины, находящейся в сжатом состоянии, которое имеет место в предварительно затянутом соединении возрастает, то есть возникает дополнительная сила, препятствующая разрушению композиционной пластины, составляющая 18-22% прочности соединения.

Вместе с тем, в работе [21] указывается, что применение затяжки эффективно только на крепежных элементах диаметром 8,0 мм и выше. Это объясняется тем, что диаметр болтов в соединениях определяет уровень предварительной затяжки, которая ограничивается прочностью болтов. Поэтому значительную предварительную затяжку удастся получить с диаметром болта 8,0 мм и более. Болты диаметром 4, 5, 6 мм дают возможность получить предварительную затяжку с моментом 25 Н/м. Это не обеспечивает эффективного повышения прочности соединения. Наибольшее повышение прочности соединения было получено с болтом диаметром 8,0 мм (момент закручивания 40 Н/м) и жесткой стальной прокладкой, ширина которой равнялась ширине композиционной пластины.

Сборку болтовых соединений производят приложением статического крутящего момента: с помощью ударных импульсов или путем приложения осевых усилий к соответствующим деталям соединения [14]. Наиболее универсальным методом является сборка приложением статического крутящего момента с помощью ручных сборочных инструментов, ручных закручивающих машин или автоматических и полуавтоматических стационарных установок. Основными преимуществами такого способа сборки является простота и высокая производительность, а недостатками - возможность появления в болте касательных напряжений, что снижает несущую способность болтового соединения, невысокая точность контроля крутящего момента при затяжке, обусловленная изменением коэффициента трения и деформированием композита. Прикладываемый к соединению крутящий момент (момент на ключе) $M_{кл}$ при затяжке уравнивается моментом сил трения в резьбе M_P и на торце гайки M_T [14]:

$$M_{кл} = M_P + M_T.$$

Момент в резьбе определяют по следующей приближенной формуле:

$$M_p = Q \frac{d_{cp}}{2} \operatorname{tg}(\beta + \rho'),$$

где Q — усилие натяжения болта;

d_{cp} — средний диаметр резьбы;

β — угол подъема винтовой линии;

$\rho' = \operatorname{arctg} \mu'$ — угол трения в резьбе (здесь $\mu' = \mu / \cos(\alpha/2)$ — приведенный коэффициент трения в резьбе; μ — коэффициент трения пары болт — гайка; α — угол профиля резьбы).

Момент трения торца гайки по поверхности соприкасающейся с ней детали при равномерном распределении давления (что наблюдается в большинстве практических случаев), можно найти из выражения:

$$M_T = \frac{1}{3} Q \mu_0 \frac{D^3 - d_0^3}{D^2 - d_0^2},$$

где μ_0 — коэффициент трения на кольцевой опорной поверхности гайки с диаметрами D и d_0 .

Заданные значения $M_{кл}$ и Q можно обеспечить, воспользовавшись методикой, изложенной в работе [14]. Согласно этой методике определяют максимальное $M_{кл\max}$ и минимальное $M_{кл\min}$ значения крутящих моментов на ключе если известны коэффициенты трения и заданы пределы изменения Q :

$$M_{кл\max} = \frac{S v_n \sigma_T \left[\frac{d_{cp}}{2} \operatorname{tg}(\beta + \rho')_{\min} + \frac{1}{3} \frac{D^3 - d_0^3}{D^2 - d_0^2} \mu_{0\min} \right]}{\sqrt{1 + 0,75 \left[d_{cp} \frac{S}{W_p} \operatorname{tg}(\beta + \rho')_{\max} \right]^2}};$$

$$M_{кл\min} = 0,55 S \sigma_T \left[\frac{d_{cp}}{2} \operatorname{tg}(\beta + \rho')_{\max} + \frac{1}{3} \frac{D^3 - d_0^3}{D^2 - d_0^2} \mu_{0\max} \right],$$

где S — площадь сечения болта;

v_n — коэффициент использования предела текучести материала болта σ_T ;

W_p — полярный момент инерции сечения болта.

Если сумма верхнего и нижнего отклонений $M_{кл}$ для техно-

логического инструмента превышает разность $M_{\text{кл max}} - M_{\text{кл min}}$, то с вероятностью θ можно утверждать то, что фактическое усилие Q натяжения болта будет находиться в пределах:

$$\frac{M_{\text{кл max}}}{\frac{d_{\text{ср}}}{2} \operatorname{tg}(\beta + \rho')_{\text{min}} + \frac{1}{3} \frac{D^3 - d_0^3}{D^2 - d_0^2} \mu_{0\text{min}}} \geq Q \geq \frac{M_{\text{кл min}}}{\frac{d_{\text{ср}}}{2} \operatorname{tg}(\beta + \rho')_{\text{max}} + \frac{1}{3} \frac{D^3 - d_0^3}{D^2 - d_0^2} \mu_{0\text{max}}}$$

Величина θ определяется по произведению вероятностей того, что величины и лежат в интервалах $\operatorname{tg}(\beta + \rho')_{\text{min}} \div \operatorname{tg}(\beta + \rho')_{\text{max}}$ и $\mu_{0\text{min}} \div \mu_{0\text{max}}$. Если разность $M_{\text{кл max}} - M_{\text{кл min}}$ меньше суммы верхнего и нижнего отклонения $M_{\text{кл}}$ для инструмента, то следует уменьшить интервалы $\operatorname{tg}(\beta + \rho')$ и μ_0 .

Следует отметить, что при механическом креплении шпакетов, в отличие от металлов, часто наблюдается [21] ослабление затяжки собранного узла (рис. 3.6). Это обусловлено, в первую очередь, деформацией связующего вследствие ползучести материала под действием усилия затяжки болтов. Наиболее склонны к ослаблению затяжки при механическом креплении соединения из термопластов и реактопластов, изготовленные холодным отверждением. Значительное ослабление соединения происходит вскоре после затяжки. Так, например, при креплении механизмов к полиэфирному стеклотекстолиту СТ-ПН-1 холодного отверждения ослабление затяжки происходит уже в течение 24 часов. Ослаблению затяжки также способствуют вибрационные нагрузки, повышенная влажность, колебание температур и сильное охлаждение.

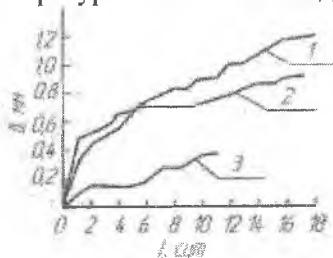


Рисунок 3.6 Зависимость деформации δ стеклотекстолита СТ-ПН-1 толщиной 25 мм от продолжительности t действия усилия затяжки, создающего в материале болта (М16) напряжение, равное 0,6 от предела текучести: для образцов с шайбой диаметром равным 35 мм (1) и 40 мм (2), а также образцов с подкладкой размерами 120x100x10 мм

В работах [14, 17, 20, 26] указывается, что стабильную затяжку болтов можно получить при введении между болтом и стенкой отверстия втулки или вставки, не уступающей по прочности болту (рис. 3.7). В этом случае усилие затяжки воспринимается вставкой, а ПКМ остается разгруженным. Вместе с тем, проведенные в работах исследования показывают, что высокая прочность таких соединений может быть обеспечена лишь при надежном закреплении втулки в материале.

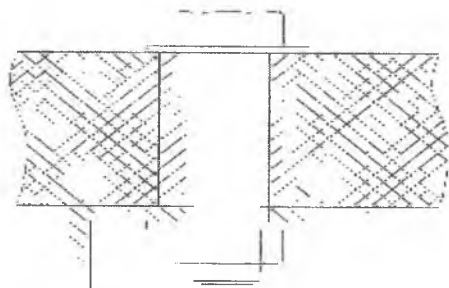


Рисунок 3.7 Конструкция подкрепления стенок отверстий
в листовой заготовке из ПКМ

4. СШИВНЫЕ И ИГОЛЬЧАТЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

Наиболее прочные соединения можно получить [5,11,25] с применением сшивки материалов и специальных иголок. Они используются для соединения мягких и гибких КМ, а также с металлами. Для определения диаметров крепежных элементов, имеющих небольшие размеры, используют формулу:

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

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;

\bar{K}_T – теоретический коэффициент концентрации напряжений около отверстия, нагруженного локальной силой;

\bar{l}_1, \bar{l}_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.

Экспериментальные исследования прочности игольчатых и сшивных 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. Сравнительная характеристика прочности сшивных соединений представлена на рис. 4.1. 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.

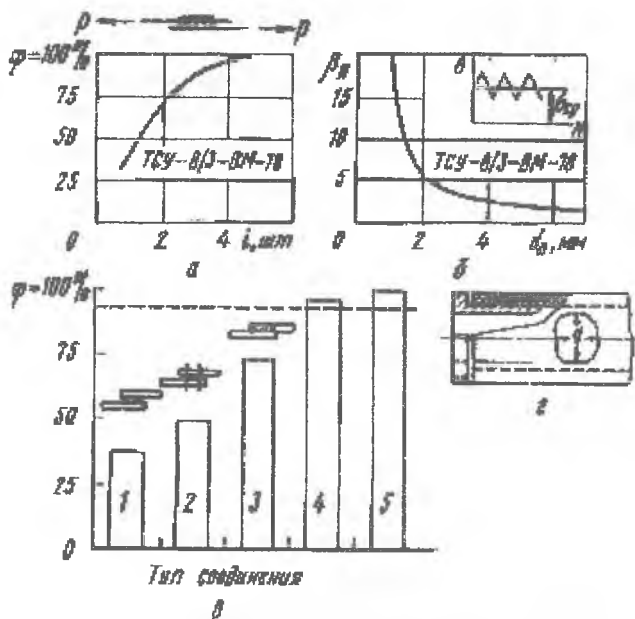


Рисунок 4.1 Сравнительная характеристика прочности шовных и игольчатых соединений: *a* – коэффициент увеличения прочности; *б* – коэффициент увеличения долговечности; *в* – сравнительная характеристика соединений; 1 – клеевые; 2 – клепаные; 3 – резьбовые; 4 – игольчатые (запрессовка); 5 – игольчатые (механическая обработка); *z* – тип образца

5. КОМБИНИРОВАННЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

Повышенные требования к прочности и надежности соединений несущих элементов конструкций из КМ обеспечиваются путем совместного применения клея и механических элементов крепежа, то есть комбинированных соединений. Сочетание клевого и механического соединений позволяет устранить недостатки, присущие обоим способам соединений [5, 11, 25]. Применительно к клеомеханическим соединениям следует отметить два важных обстоятельства, которые требуют решения: обеспечение совместности деформации механического и клевого соединений и необходимость создания требуемого давления в клеевой прослойке при ее полимеризации.

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. Процесс клепки конструкций, содержащих неотвержденные клеевые прослойки, сопровождается сложными явлениями, происходящими в клеевой пленке и в 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.

Зависимость деформаций от нагрузки для различных видов клееклепаных соединений (материал пакета КМУ-3+Д19, материал

заклепок из СЦ) показана на рис. 5.1.

Следует отметить, что, как правило, деформативность клепаных соединений значительно выше клеевых. Это приводит к снижению прочности клееклепанных 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. Клееклепанные соединения, выполненные по отвержденному клею, вследствие более благоприятного распределения внутренних напряжений в КМ и клею обладают большей прочностью и выносливостью.

Во многих случаях целесообразно в качестве комбинированных соединений применять клеесшивные и клееигольчатые соединения. При этом способ шивки 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.

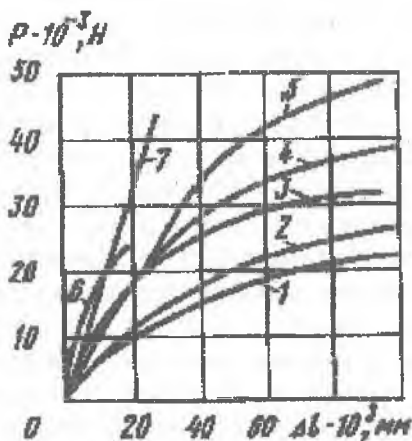


Рисунок 5.1 Графики зависимостей деформации Δl от нагрузки P , материала и количества i заклепок: 1 – 3 – клепаные соединения при $i = 1 \dots 3$ соответственно; 4 – 5 – Клееклепанные по сырому и отвержденному клею соответственно (клей ВК-36; $i = 3$); 6 – 7 – клеевые (клей ВК-34 и клей ВК-36; пленка)

6. АНАЛИЗ ФАКТОРОВ ПОВЫШЕНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ОТВЕРСТИЯМИ

6.1. Местное усиление материала армированием

Напряженное состояние по контуру отверстия зависит от схемы армирования и от вида прикладываемой нагрузки. Исследование материалов с различными схемами армирования на действие растяжения под углом к направлению наибольшего армирования, при всестороннем сжатии (растяжении), при сдвиге под разными углами к направлению наибольшего армирования, при изгибе пластины (рис. 6.1) показало, что напряжения в районах отверстий изменяются в широких пределах. Соответственно изменяются и величины коэффициентов концентрации напряжений $f_k = \sigma_{0 \max} / P$. Величины напряжений в районах концентраций зависят от упругих свойств материала. При этом зависимости коэффициентов концентрации от изменения $\gamma_0 = \sqrt{E_1 / E_2}$ (E_1 – модуль упругости материала в направлении оси X ; E_2 – модуль упругости материала в направлении оси Y) имеют вид, показанный на рис. 6.2. Анализ графика (рис. 6.2) показывает, что с увеличением γ_0 величина коэффициентов концентрации при всех видах нагружения повышается. Наибольшие коэффициенты концентрации при всех видах нагружения имеют место для случая сдвига пластины под углом 45° к главным осям.

Анализ показывает, что прочностные характеристики соединения при варьировании его геометрическими параметрами и направлением приложения нагрузки существенно не увеличиваются и не превышают 30% от прочности сплошного материала.

Наиболее эффективным способом повышения несущей способности соединений ПКМ является местное усиление материала. Местное усиление материала получают путем утолщения материала, изменения жесткости слоев в зоне отверстий, армирования изотропной высокопрочной фольгой и релаксационной прокладкой, а также формированием высокомодульных и низко модульных стоперов трещин.

Утолщение в зоне соединительного шва получают, укладывая между основными слоями дополнительные вставки различной длины на стеклянной ткани, пропитанной связующим (рис. 6.3). Исследования [16] показали, что зависимость увеличения относительной прочности соединения от утолщения стеклопластика имеет нелинейный характер. Это объясняется тем, что с увеличением толщины материала в зоне шва приходится увеличивать и диаметр крепежного элемента.

Для снижения уровня действующих напряжений в детали из ПКМ с отверстиями используют местное изменение жесткости слоев. Оно заключается в уменьшении слоев пояса обшивки в зоне действия концентрации напряжений или повышении жесткости слоев пояса обшивки в области примыкающей к зоне действия концентрации напряжений. В работе Г.А. Молодцова [19] для снижения уровня действующих напряжений в зоне концентрации материал продольных слоев (с ориентацией 0°) заменялся материалом с меньшим модулем упругости (угольные волокна заменялись стеклянными) (рис. 6.4). Проведенные экспериментальные исследования показали повышение сопротивления усталости соединения.

Армирование соединяемых элементов высокопрочной изотропной фольгой осуществляют с помощью стальных или титановых пластин толщиной $0,03 - 0,1$ мм, укладываемых между основными слоями материалов [28, 32]. Установлено [28], что если разрушение соединения происходит при растяжении, то общую толщину слоев фольги, необходимую для обеспечения относительной прочности $f=1$, определяют из условия равнопрочности по формуле:

$$\sigma_\psi = \frac{\delta\sigma_p}{\sigma_{p\phi}} \left[K_\phi \frac{1}{(1-\lambda)} - \frac{YK_\phi}{K} \right], \quad (6.1)$$

где δ – толщина ПКМ;

σ_p и $\sigma_{p\phi}$ – разрушающие напряжения при растяжении соответственно ПКМ и фольги;

K_ϕ и K – коэффициенты концентрации напряжений около отверстия соответственно в фольге и в ПКМ;

Y – коэффициент, учитывающий увеличение прочности основного материала при армировании фольгой (принимают равным $1.0 - 1.05$).

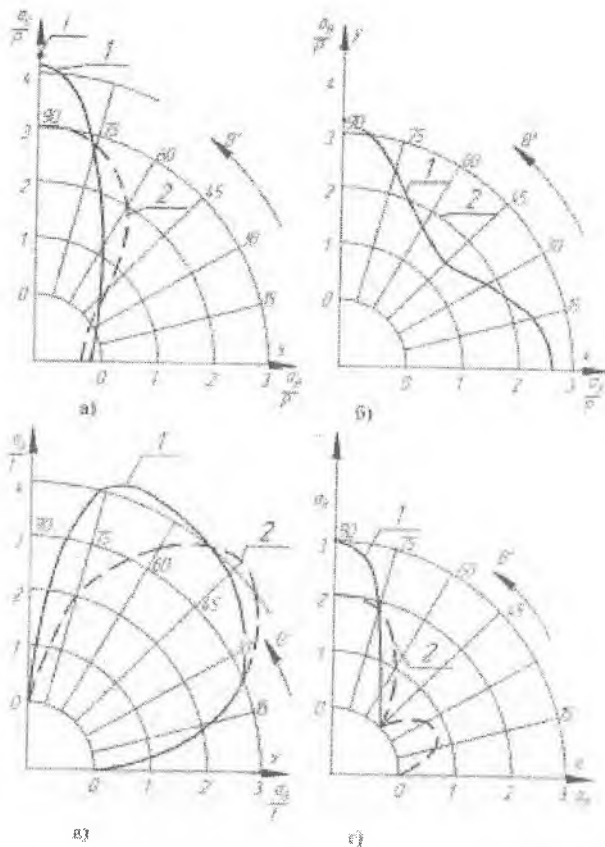


Рисунок 6.1 Схемы распределения напряжений на контуре отверстия в пластине из стеклопластика 5:1:

- а) - σ_0 / P при растяжении в главном направлении (1), то же для изотропного материала (2);
- б) - σ_θ / P при всестороннем растяжении (смятии) (1), то же для изотропного материала (2);
- в) - σ_θ / t при сдвиге пластины, когда сдвиговые усилия t направлены параллельно осям анизотропии (1), то же для изотропного материала (2);
- г) - σ_0 при изгибе пластины (балки), когда оси симметрии пластины совпадут с осями анизотропии материала (1), то же для изотропного материала (2) $M_a / J - 1$

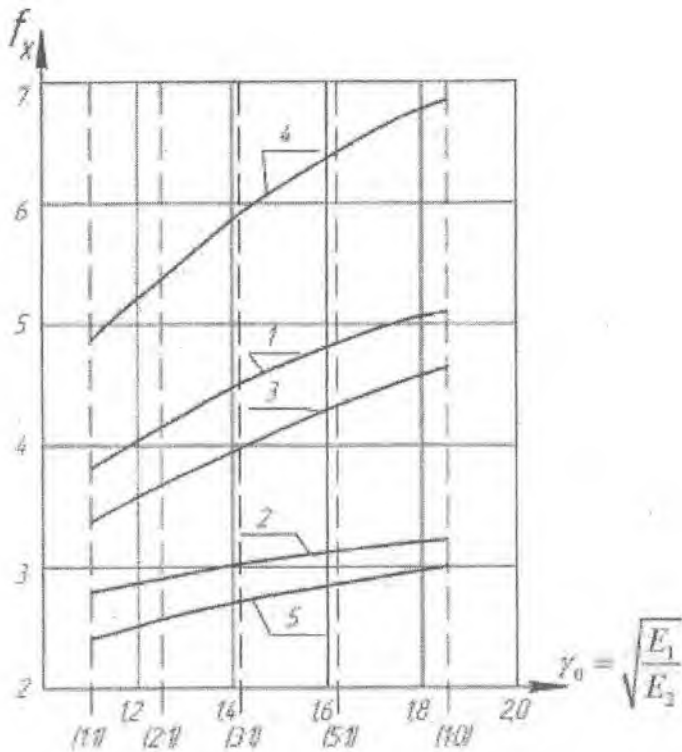


Рисунок 6.2 Зависимость изменения коэффициентов концентрации напряжений в пластинах из стеклопластика ($f_k = \sigma_0 / P$)

в районе отверстий от отношения модулей упругости $\gamma = \sqrt{E_1 / E_2}$:

- 1 – растяжение в главном направлении;
- 2 – всестороннее сжатие (растяжение);
- 3 – сдвиг параллельно главным осям анизотропии;
- 4 – сдвиг под углом 45° к главным осям;
- 5 – изгиб.

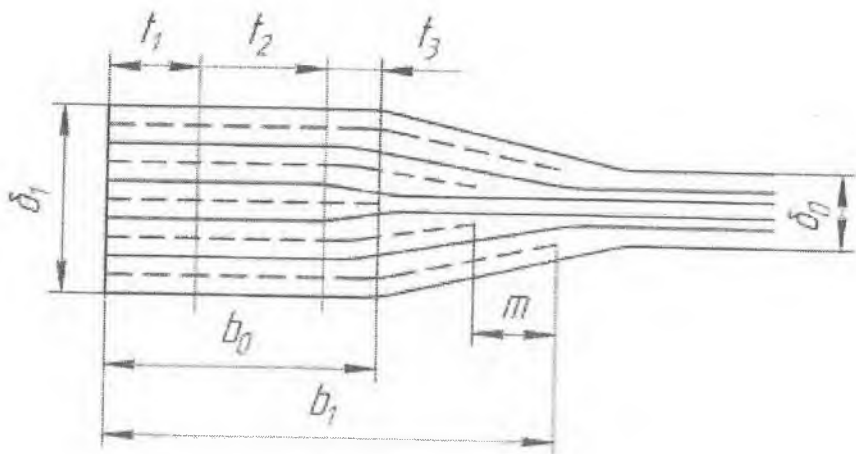


Рисунок 6.3. Утолщение стеклопластика в зоне шва при контактном формировании деталей:

— основные слои; - - - - - дополнительные вставки.
 Буквы на рисунке обозначают основные размеры конструкции



Рисунок 6.4. Армирование материала в зоне отверстия

Подкрепление вырезов в панелях из ПКМ высокомодульными элементами (ВМЭ) осуществляется путем введения дополнительных однонаправленных слоев углепластика, ориентированных вдоль оси нагружения. В зависимости от способа формирования различают два вида ВМЭ. В первом случае дополнительные слои углепластика вкладывают в процессе выкладки панели между слоями исходной укладки в виде двух полос (рис. 6.5 а). Эти полосы ориентированы вдоль оси нагружения и находятся на расстоянии, равном размеру отверстия. Во втором случае в процессе выкладки между слоями исходной укладки вкладывают дополнительные слои углепластика в виде накладок, а затем в месте подкрепле-

ния выполняют отверстие заданного размера (рис. 6.5 б). Равномерное распределение нагрузки в ВМЭ между дополнительными слоями достигается за счет плавного перехода от основного материала к ВМЭ, формируемого постепенным уменьшением размеров вкладываемых полос или накладок. Экспериментальные данные [30] показывают, что сформированные ВМЭ позволяют повысить прочность при растяжении углепластиковых панелей с круглым вырезом в 1,3...2 раза.

Преимуществом данного метода является то, что для формирования основного металла и ВМЭ используют один и тот же наполнитель. Однако он требует большого увеличения массы панелей для достижения эффективности подкрепления вырезов.

Если рассматривать в целом местное усиление ПКМ, то он обладает рядом недостатков [30]: невозможность применения серийного листового материала для изготовления деталей, сложная технология производства, сложность контроля качества склейки композиционного материала с металлической лентой, наличие значительных температурных напряжений в зоне стыка при тепловой обработке и при эксплуатации в условиях повышенных температур.

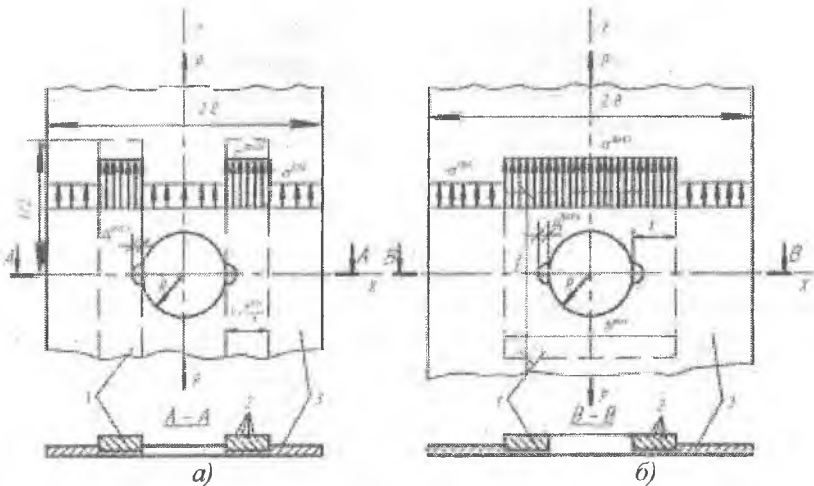


Рисунок 6.5 Углепластиковые панели с круглым вырезом, подкрепленным ВМЭ в виде полос (а) и накладок (б): 1 – ВМЭ; 2 – дополнительные слои углепластика, уложенные под углом 0° ; 3 – основной материал

6.2. Подкрепление стенок отверстий изделий из композиционных материалов элементами из однородных материалов

Одним из способов повышения несущей способности механического точечного соединения ПКМ является подкрепление стенок отверстия элементами в виде втулок и колец из однородных материалов, устанавливаемых между болтом и стенкой отверстия (рис. 3.7). Подкрепление предполагает совместную работу подкрепляющего элемента и листовой заготовки вокруг отверстия. При этом на границе их контакта должно выполняться условие сопряжения: $\sigma_r^{(1)} - i\tau_{r\varphi}^{(1)} = 0$;

$$\sigma_r - i\tau_{r\varphi} = \sigma_r^{(1)} - i\tau_{r\varphi}^{(1)}; \quad v_r - iv_\varphi = v_r^{(1)} - iv_\varphi^{(1)}, \quad (6.2)$$

где σ_r и $\sigma_r^{(1)}$ - радиальные напряжения соответственно на границе отверстия в листовой заготовке и на внешнем контуре втулки;

$\tau_{r\theta}$ и $\tau_{r\theta}^{(1)}$ - касательные напряжения;

σ_θ и $\sigma_\theta^{(1)}$ - тангенциальные напряжения.

Исследованию напряженно-деформированного состояния растягиваемой полосы с центральным круглым отверстием, в которое вставлена шайба, нагруженная дополнительным, направленным по оси полосы усилием, посвящены работы Мухелишвили Н.И., Савина Г.Н., Лехницкого С.Г. [17, 20, 26].

В работе Г.И. Савина [26] рассматривается теоретическая задача о неограниченной изотропной плоскости, в отверстие которой впаяно кольцо. В задаче определялись составляющие напряжения и перемещения, как в изотропной плоскости, так и в кольце. Основываясь на полученных аналитических зависимостях, делается вывод:

- наличие колец оказывает местное влияние и на расстоянии $(4-5)d$ от центра отверстия практически это влияние не сказывается;

- с увеличением ширины жесткого кольца уменьшается концентрация напряжений в пластинке, но при этом с уменьшением ширины кольца, увеличиваются значения тангенциальных напряжений σ_θ ;

- с увеличением ширины жесткого кольца уменьшается напряжение, как в кольце, так и в пластинке.

В работе отмечается, что можно подобрать такие физико-

механические и геометрические характеристики кольца, которые бы значительно уменьшили напряжение в пластинке вдоль контура её спая с кольцом по сравнению со сплошной пластиной. В этой же работе рассматривается задача о подкреплении стенок отверстия в анизотропной пластинке изотропным кольцом. Приведенные в работе аналитические зависимости говорят о том, что при наличии подкрепляющего кольца весьма существенно перераспределяется напряжение в пластинке и снижается коэффициент концентрации напряжений более чем в 3 раза.

В работе С.Г. Лехницкого [17] рассматривается задача о подкреплении стенок отверстий в ортотропной пластине абсолютно жестким и упругим ядрами. Результаты теоретических исследований сопоставляются с результатами для аналогичной пластины со свободным отверстием. На рис. 6.6 показаны результаты исследований для одностороннего и двухстороннего растяжений. Из графиков видно, что при наличии жесткого ядра наибольшим является напряжение σ_r на концах диаметра, параллельного растягивающим усилиям; оно равно $\sigma_r = 1,237P$. При отсутствии ядра наибольшим является напряжение σ_θ ; оно равно $\sigma_\theta = 5,453P$ и действует на концах диаметра, перпендикулярного к направлению растягивающих усилий. В случае упругого ядра величина наибольшего тангенциального напряжения равна $\sigma_\theta = 1,684P$ и действует на концах диаметра, нормального к направлению усилий. Отмечается, что при растяжении пластины в направлении, для которого модуль упругости E_1 является наименьшим, качественная картина распределения напряжений не меняется.

В качестве технологического способа постановки подкрепляющего элемента предлагается клеивание [18]. Проведенные в работе исследования показали, что установка стальной втулки эффективна, так как снижает концентрацию напряжений, окружающих в 4-5 раз и радиальных в 2-3 раза. На уровень напряжений вокруг отверстия большое влияние оказывают жесткость клея и зазор между втулкой и листовой заготовкой. Полученные в работе результаты свидетельствуют о том, что с увеличением жесткости клея G с 3000 до 30000 МПа окружающие напряжения снижаются приблизи-

тельно на 10% (со 110,7 до 101,6 МПа). С увеличением зазора наблюдается увеличение концентрации напряжения. Наличие клея позволяет существенно сгладить концентрацию напряжений, связанную с наличием зазора при установке втулки и приближает уровень напряжённо-деформированного состояния к уровню при установке втулки без зазора, то есть к идеальному случаю. Вместе с тем, как отмечается в работе, совместная работа подкрепляющей втулки, клеевой прослойки и стенок отверстия в листовой заготовке происходит только до определенного уровня напряжений, после чего клей перестает выполнять эту функцию и НДС изменяется. Исследования показали, что участок совместной работы втулки, клеевой прослойки и листовой заготовки не превышает 15-20% от разрушающей нагрузки для образцов с $h/d=1,0$ и 7-12% для образцов с $h/d=3,0$ (h -высота детали; d -диаметр отверстия). При дальнейшем увеличении нагрузки происходил разрыв клея между втулкой и пластиной по линии действия силы, в результате чего появлялся зазор, картина напряженно-деформированного состояния резко менялась и была близка к состоянию, полученному для пластины с обыкновенным болтовым соединением. Разрушение клеевой прослойки происходит в результате действия на контуре отверстия в заготовке радиальных напряжений (рис. 6.6), возникающих в процессе действия растягивающих напряжений.

Следует также отметить, что использование данного технологического способа при диаметре чистового отверстия в листовой заготовке менее 10,0 мм не всегда представляется возможным. Это объясняется тем, что выдержать рекомендуемый зазор, равный 0,23% между втулкой и листовой заготовкой при данных размерах отверстия представляет значительные трудности. Увеличение же зазора ведет к уменьшению стадии совместной работы втулки и листовой заготовки, что в свою очередь приводит к потере эффективности подкрепления.

Проведенный анализ показывает, что подкрепление стенок отверстий втулками является эффективным способом повышения несущей способности механических точечных соединений. Оно позволяет снизить концентрацию тангенциальных и радиальных напряжений соответственно в 4-5 раз и в 2-3 раза.

В работах [7, 8, 10] разработан способ постановки втулки (рис. 6.7), заключающийся в осевом пластическом сжатии подкреп-

ляющего элемента, который представляет собой цилиндрическое тело с выступами в виде сегментов на верхнем торце. В процессе осуществления сжатия внутренний диаметр втулки остается неизменным, а по его внешнему диаметру осуществляется радиальная раздача совместно с соответствующими участками заготовки с образованием на границе соединения переменного поля радиальных сжимающих напряжений.

В работах [7, 10] разработана математическая модель, определяющая зависимость конструктивных параметров процесса образования отверстий с подкрепленными стенками на деформированное состояние подкрепляющего элемента по внешнему контуру и на границе отверстия листовой анизотропной детали.

Проектирование механических точечных соединений с подкреплением производится с учетом нагрузок, действующих при эксплуатации. При этом наиболее часто встречается растягивающая нагрузка, действующая на деталь и силовую точку. Поэтому раздача по внешнему контуру подкрепляющего элемента должна быть выбрана таким образом, чтобы сохранить клеевую прослойку, а с ней и эффект подкрепления.

Полученные в результате КЭ - расчетов радиальные напряжения σ_r по контуру отверстия при постановке втулки путем вклеивания без натяга показаны на рис. 6.8 а. По всему контуру отверстия действуют растягивающие напряжения, величина которых меняется в пределах 17 – 40 % от внешней растягивающей нагрузки, что может привести к разрушению клеевой прослойки.

Для случая, когда запрессованная втулка имеет форму внешнего контура, обеспечивающую натяг, определяемый функцией $v_r(\varphi) = a + b \cdot \cos(4\varphi - \pi)$, где $a=0,0175$ мм, $b = 0,0025$ мм, эпюра радиальных напряжений показана на рис. 6.8 в. Результирующие напряжения от растягивающей нагрузки, действующей на пластинку с запрессованной и вклеенной втулкой, показаны на рис. 6.8 б, из которого видно, что максимальные результирующие напряжения существенно снижены.

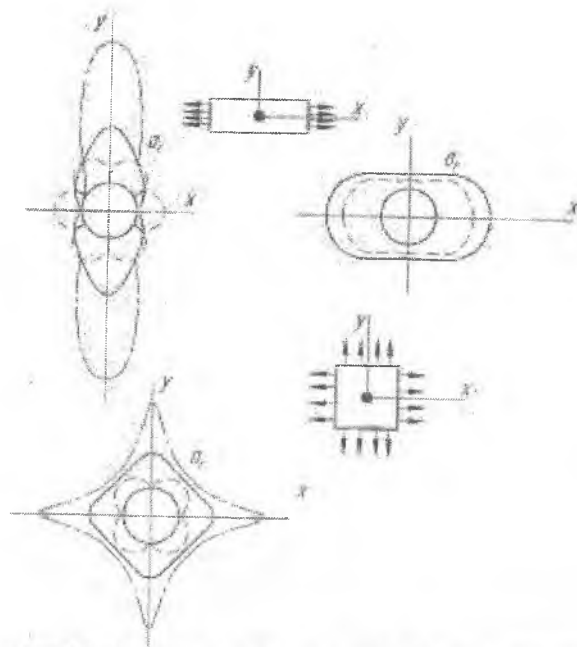


Рисунок 6.6. Влияние подкрепляющего ядра на напряженное состояние по периметру отверстия

- уругое ядро
- - - жесткое ядро
- · - · - ядро отсутствует

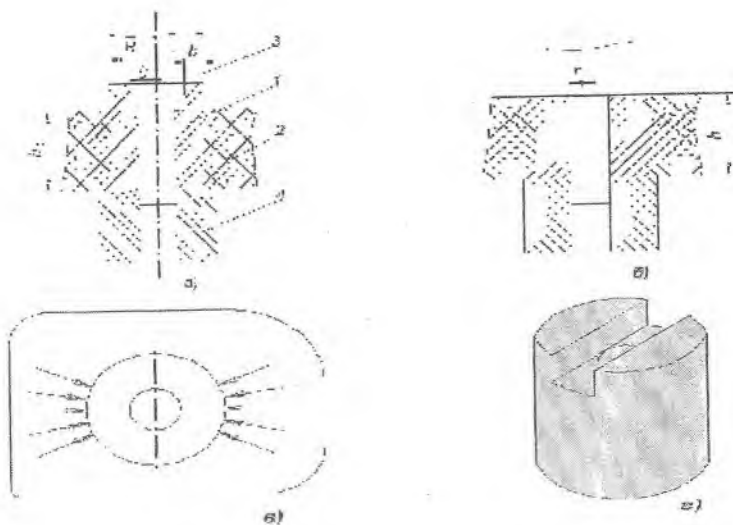


Рисунок 6.7 Способ осадки подкрепляющего элемента: где а, б) процесс осадки подкрепляющего элемента; в) поля радиальных сжимающих напряжений; г) подкрепляющий элемент. 1-;подкрепляющий элемент; 2) листовая заготовка; 3) пуансон; 4) подпирющий элемент

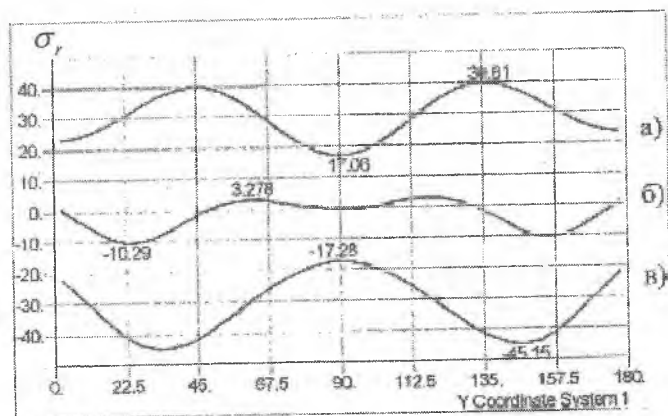


Рисунок 6.8 Радиальные напряжения по контуру отверстия в пластинке: а) напряжения только от внешней нагрузки; б) результирующие напряжения от внешней нагрузки и преимущественного натяга; в) напряжения от запрессовки с преимущественным натягом подкрепляющей втулки.

7. ОСОБЕННОСТИ СОЕДИНЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ТРЕХСЛОЙНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

7.1. Существующие способы образования соединений трехслойных панелей с элементами конструкций

Одной из важнейших проблем при проектировании и производстве конструкций с использованием трехслойных панелей является их соединение с другими элементами конструкций. Это связано с тем, что трехслойные панели не выдерживают высокие сосредоточенные нагрузки, характерные для механических точечных соединений [13, 14, 15]. Для успешной разработки агрегатов с применением трехслойных панелей необходимо четко представлять взаимодействие силовых стыковых элементов панели при передачи нагрузок от стыкового шва в месте соединения со смежной конструкцией к основным силовым элементам панели – несущим обшивкам и заполнителю. Кроме того, при неправильном выборе конструкции стыковочных элементов (невозможность технологического исполнения или недостаточный учет прочностных особенностей) собранный агрегат может не выдержать расчетных нагрузок или будет тяжелее агрегата, изготовленного из панелей другого типа, даже если собственно сотовая панель (без учета стыковочных элементов и усилений) легче панелей другого типа.

На рис. 7.1. показаны конструкции типовых узлов клееных панелей летательных аппаратов. В узле, изображенном на рис. 7.1 а панель 1 может воспринимать перерезывающую силу и изгибающий момент, а также сдвиг и сжатие в плоскости панели. В узле на рис. 7.1 б, панели 1 и 2 воспринимают все виды нагружения: сжатие, сдвиг, изгиб. Соединение панелей на рис. 7.1 в передает перерезывающую силу, а также изгибающий и крутящий моменты, переходящие с клеевой законцовки 1.

При правильном выполнении конструкции с сотовым заполнителем из неметаллических материалов, они хорошо воспринимают как равномерно распределенные, так и сосредоточенные нагрузки. В последнем случае в конструкциях предусматривают местные усиления (рис. 7.2). Характерным типовым конструктивным решением, внедренным в конструкции агрегатов, выполненных из трех-

слоистых конструкций, является широкое использование в соединениях узлов специальных заливочных композиций и пенопласта, от которых зависит несущая способность конструкций (рис. 7.2 д, е). Вместе с тем данный способ местного усиления значительно увеличивает трудоемкость изготовления трехслойных панелей и повышает их массу.

При действии эксплуатационных нагрузок сотовый наполнитель воспринимает поперечные силы и обеспечивает совместную работу несущих слоев как при изгибе, так и при действии нормальных и касательных сил. Однако сам сотовый наполнитель не воспринимает изгибающих моментов и сил, лежащих в срединной поверхности, ибо он обладает малой жесткостью по сравнению с внешними слоями. Поэтому сосредоточенные нагрузки, прикладываемые к отдельным участкам сотовых конструкций, передаются через специальные вкладыши или втулки [13, 14]. Для указанных классов заделок при передаче нагрузок необходима связь силовой точки, передающей сосредоточенную силу на трехслойную панель с обшивками.

Имеются сведения [13] (рис. 7.3 а) об использовании в качестве технологического способа постановки вкладышной сварку. Однако этот способ является трудоемким и может быть использован только для трехслойных конструкций с металлическими обшивками.

Одним из распространенных способов постановки подкрепляющего вкладыша является его заливка клеевой массой. Это позволяет осуществить необходимую связь крепежного элемента, передающего сосредоточенную нагрузку на трехслойную панель, непосредственно с наполнителем и обшивкой. При этом, традиционной конструкцией является конструкция цилиндрического вкладыша (рис. 7.3 б). Перед установкой вкладыша в верхней оболочке панели сверлится отверстие, диаметр которого несколько меньше его внешнего диаметра. В глухое отверстие заливается эпоксидный клей, который при установке вкладыша заполняет отверстие по внешнему диаметру, создавая достаточную прочность соединения. Вместе с тем, этот способ обладает малой производительностью и силовая точка, полученная данным способом, имеет повышенную массу.

Для постановки крепежного элемента используются также

втулки телескопического типа (рис. 7.3 в), устанавливаемые путем завинчивания одного элемента в другой. Данные втулки имеют фланцы для стягивания панелей по высоте с целью уменьшения отрывающих усилий, действующих на обшивку при нагружении болта. Вместе с тем, стенки втулок телескопического типа имеют, как правило, толщину вдвое больше, чем у простых втулок и поэтому имеют большую массу.

С целью повышения производительности процесса образования соединений «втулка – трехслойная конструкция» и снижения их массы предложен ряд способов, заключающихся в осевом пластическом сжатии устанавливаемого элемента. В работах [2,24] предложены конструкции вкладыша для соединения сотовых панелей с арматурой (рис. 7.4). Вкладыш запрессовывается в сотовую панель специальным инструментом. В процессе запрессовки по внешнему контуру вкладыша образуется тороидальная поверхность, с помощью которой происходит закрепление крепежного элемента между верхней и нижней обшивками.

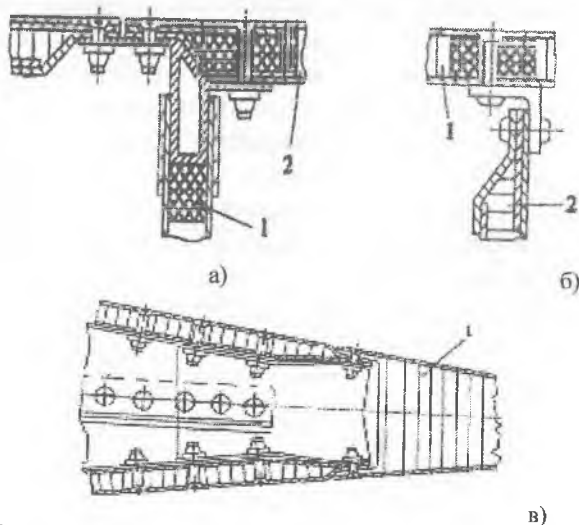


Рисунок 7.1 Конструкции типовых узлов клееных панелей:

- а) конструкции, воспринимающие срезающую силу и изгибающий момент;
- б) конструкции, воспринимающие сжатие, сдвиг и изгиб;
- в) конструкции, воспринимающие срезающую силу, изгибающий и крутящий момент: 1 и 2 – панели

7.2. Исследование процесса постановки вкладыша в отверстие трехслойной конструкции путем запрессовки

Для образования надежного соединения «вкладыш - трехслойная конструкция» при запрессовки крепежного элемента необходимо точно знать размеры тороидальной поверхности. Это объясняется тем, что если тороидальная поверхность не будет касаться верхней обшивки, то вкладыш не будет закреплен между верхней и нижней обшивками. В связи с этим соединение не будет иметь необходимую несущую способность. В случае, если тороидальная поверхность будет иметь чрезмерно большие размеры, то может произойти отрыв верхней обшивки от заполнителя. Это также может снизить несущую способность соединения.

Для определения параметров крепежного элемента в работах [2] проведены теоретические и экспериментальные исследования, которые показали, что тороидальная поверхность по внешнему диаметру трубчатой заготовки после ее осевого пластического сжатия образуется в том случае, если на его внутренней поверхности имелась проточка (рис. 7.4). В этом случае в процессе осадки заготовки происходит деформация материала в районе проточки, способствующая образованию тороидальной поверхности. В результате получены аналитические зависимости для расчета деформированного состояния, работы и усилия при осевом сжатии вкладыша, позволяющие назначить оптимальные конструкторско-технологические параметры процесса постановки вкладыша в отверстие трехслойной конструкции.

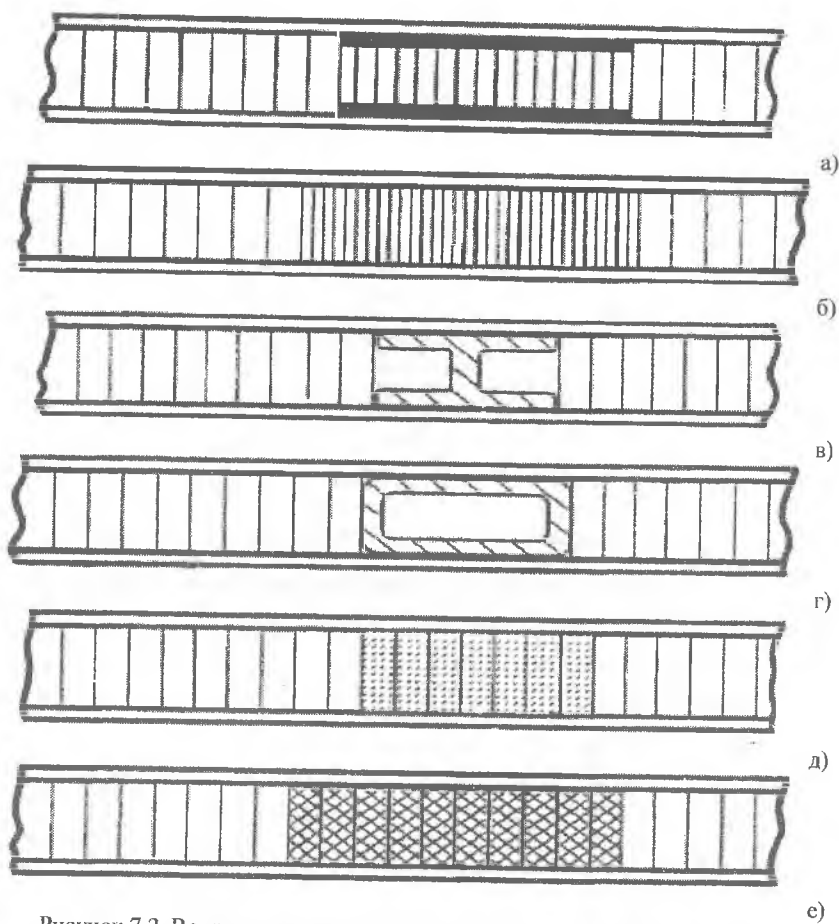


Рисунок 7.2. Варианты местного усиления трехслойных конструкций:
 а) накладками; б) уплотненным сотовым наполнителем; в) профилем;
 г) профилем; д) заливкой заполнителя; е) пенопластом.

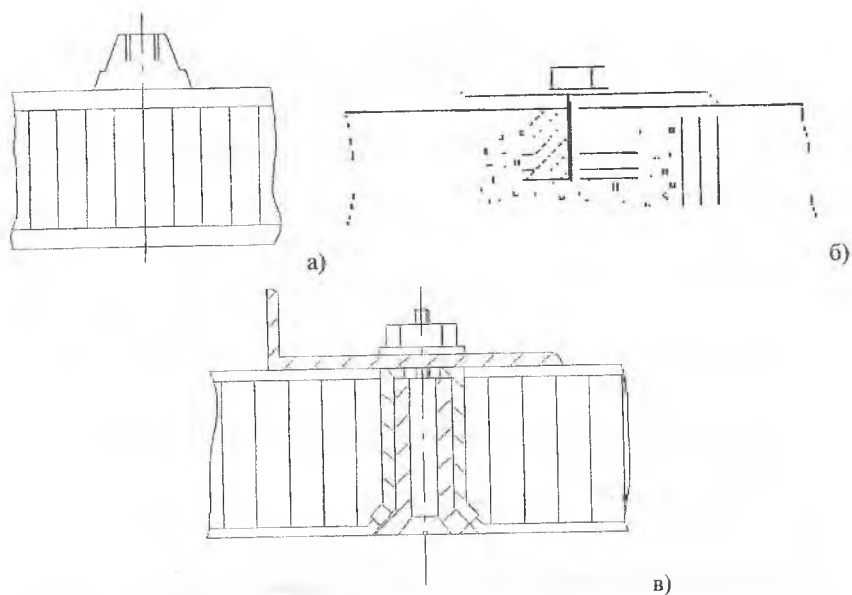


Рисунок 7.3. Способы закрепления вкладышей в отверстиях трехслойной конструкции: а) сваркой; б) клеевым соединением; в) телескопическим соединением

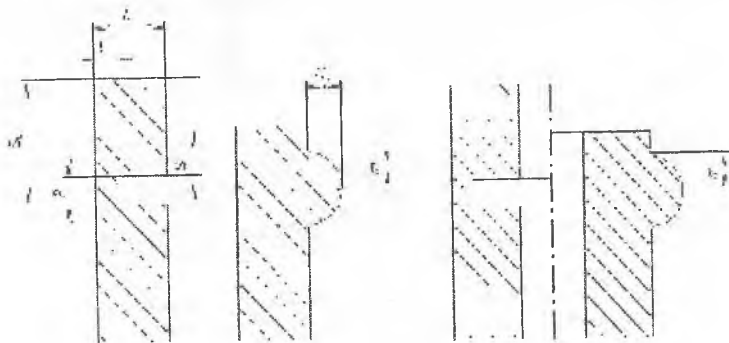


Рисунок 7.4. Геометрические параметры вкладыша

Несущая способность соединения «вкладыш - трехслойная конструкция» оценивалась [9] при статистических и повторно-статистических нагрузках. Испытанию подвергались следующие серии образцов:

- с отверстиями и вкладышам, установленными путем заливки грунтовки;

- с отверстиями и вкладышами, установленными путем осевого сжатия.

Результаты статистических испытаний, проведенных по двум схемам нагружения сведены в таблице 7.1.

Результаты повторно-статических испытаний сведены в таблице 7.2.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что создание по внешнему контуру тороидальной поверхности позволяет «включить» в работу верхнюю и нижнюю обшивки панели. В результате повышается статистическая прочность соединения на 20 - 24% и увеличивается его циклическая долговечность на 27-30 % (табл. 7.2). Результаты испытаний также показали, что разрушению подвержена зона верхней обшивки, прилегающая к чистовому отверстию или вся панель, что характерно для высоконагруженных соединений.

Таблица 7.1 Результаты статических испытаний


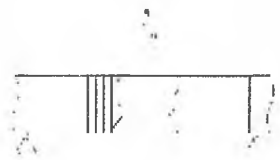
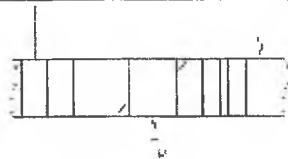
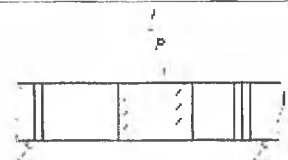
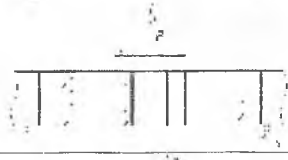
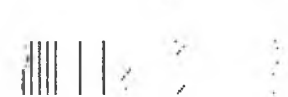
№ схемы	Схема испытаний	$\frac{P_a}{P}$ <i>разр. соед</i>	$P_{разр}$, Н	$N_{циклов}$	Место разрушения
I		0...0,67	13500	$2,5 \times 10^4$	Вся панель
II		0...0,67	4800	4×10^2	Панель у стыка

Таблица 7.2 Результаты повторно – статических испытаний

№ схемы	Схема испытаний	Размеры образца, мм	h, мм	$P_{разр}$, Н	Место разрушения	$P_{разр}$, Н Клеевая технология
I		200x200	22	13200-13800	Панель у стыка	13000
II		250x150	22	4720-4860	Панель у стыка	4400
III		250x150	22	11150-11240	Вся панель	-----
IV		250x150	22	5000-5800	Панель у стыка	5100

Использование трехслойных панелей даёт возможность значительно снизить массу изделия по сравнению со стрингерными конструкциями, однако при постановке в панели соединительных вкладышей, выполненных из материала с большой плотностью, наблюдается потеря выигрыша массы от использования трехслойных конструкций. В связи с этим проводилась оценка значения потери выигрыша массы от использования трехслойной панели [32] с помощью коэффициента:

$$K = \frac{(1 - \psi_{соед}) \cdot (\Omega_1 \cdot \bar{\delta}^2 + \Omega_2 \cdot \bar{\delta}^2 \cdot \bar{h} + F_{ред}) \cdot L}{(1 - \theta) \cdot (2 \cdot \bar{\delta} + f \cdot \bar{h}) \cdot \psi_L}$$

где $\psi_{соед}$ - приращение массы панели для обеспечения соединения

(для точечных соединений квадратных панелей $\psi_{соед} = 0$; $\Psi_L = 1$),

Ω_1 и Ω_2 - коэффициенты, учитывающие тип вкладыша;

$$\bar{\delta} = \delta_0 / L; \quad \bar{h} = h / L;$$

δ_0 - толщина обшивки трехслойной панели;

h - высота панели, $F_{ред} = p_{усл} \cdot F_1 / p$;

p - плотность материала обшивок, $p_{усл}$ - плотность материала усиления и узлов, присоединяемых к изготовленной панели, F_1 - площадь присоединяемых элементов;

L - длина панели;

f - коэффициент плотности заполнителя $f = k_1 \cdot \delta_\phi / r$;

δ_ϕ - толщина фольги (для квадратной ячейки заполнителя

$\delta_\phi / r = 0,01$; $k_1 = 2$ и $f = 0,02$);

θ - коэффициент эффективности;

$\theta = m_{mn} / m$; m_{mn} - масса трехслойной панели;

m - масса панели другого типа.

При $K < 1$ - выигрыш массы от применения трехслойной панели с данными соединительными элементами имеет место; при $K = 1$ - выигрыш массы отсутствует; при $K > 1$ - массы конструктивной трехслойной панели больше, чем масса панели сравниваемого типа.

Для определения значения потери выигрыша массы трехслойной панели необходимо оценить в первую очередь влияние массы стыковочных элементов $m_{ст.эл}$ в зависимости от параметров панели (δ_0 , h , δ_ϕ , r).

Для сравнения использовались соединения полученные:

- с помощью вкладыша разрабатываемой конструкции;
- путем клеивания вкладыша;
- с помощью вкладыша телескопической конструкции.

На рис. 7.5. приведена зависимость приращения массы панели от параметров δ_0 и h для вкладышей, установленных по разработанной и клеевой технологиям, а также с помощью телескопиче-

ского соединения.

Анализ зависимостей приращения массы панели для рассматриваемых типов вкладышей позволяет сделать следующие выводы:

1. Относительное приращение массы вкладыша разработанной конструкции зависит как от высоты панели h , так и от толщины обшивки δ_0 .

2. Значение относительного приращения массы при использовании вкладышей разработанной конструкции в 1,8 - 2,0 раза ниже, чем у вкладышей телескопического типа.

3. С увеличением толщины обшивки δ_0 относительное приращение массы уменьшается. Для панели со средней толщиной обшивки $1 \cdot 10^{-3}$ относительное приращение массы не превышает 5 %.

Коэффициент потери выигрыша массы при стыковке K зависит как от параметров панели (δ_0 и h) и типа соединения (Ω_1 и Ω_2), так и от величины коэффициента эффективности первого приближения θ . Чем меньше получен выигрыш массы от применения собственно трехслойной панели (чем ближе к 1 величина θ), тем больше величина K , следовательно, больше вероятность потерять при применении стыковок этот выигрыш. Анализируя графики на рис. 7.6, можно сделать вывод, что целесообразность применения вкладышей разработанной конструкции сильно зависит от высоты h . Чем меньше h , тем больше (при прочих равных условиях) доля потери выигрыша массе конструкции при применении стыковых соединений.

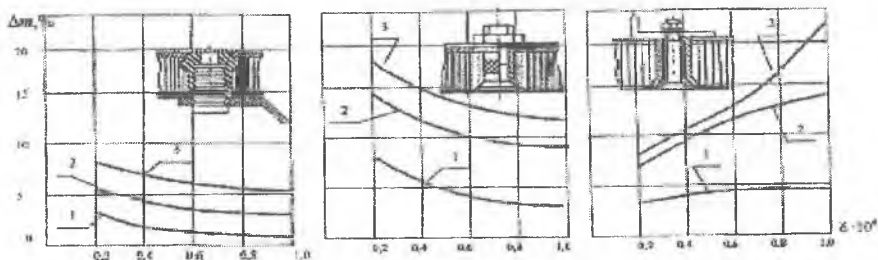


Рисунок 7.5. Зависимость массы вкладышей от параметров панели:

а) вкладыш разработанной конструкции; б) втулка телескопической конструкции; в) вкладыш, установленный по клеевой технологии;

1. $h=100$ мм; 2. $h=50$ мм; 3. $h=10$ мм

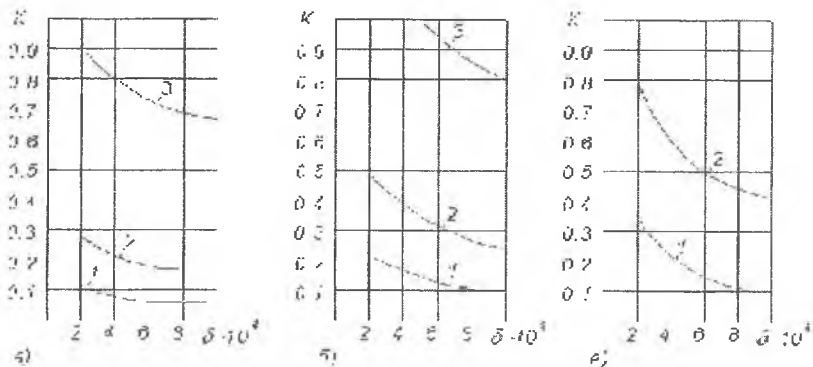


Рисунок 7.6. Зависимость коэффициента потери выигрыша массы панели K от параметров панелей коэффициента эффективности θ :

а) $h=100,0$ мм; б) $h=50,0$ мм; в) $h=10,0$ мм;

1. $\theta=0,5$; 2. $\theta=0,7$; 3. $\theta=0,9$

7.3. Разработка оборудования и оснастки для осуществления технологических процессов постановки подкрепляющих элементов

Для реализации технологического процесса постановки крепежных элементов применительно к условиям ступенчатой сборки разработан [3] манипулятор (рис. 7.7). Манипулятор представляет собой шарнирный двухзвенник с системой самофиксирующихся шарниров 4. Манипулятор устанавливается на раму стапеля 2 и фиксируется с помощью струбцин 3. На сферическом шарнире 4 манипулятора можно закрепить как клепальный молоток (инструментальную головку), так и устройство для сверильно-зенковальных работ. В разработанном манипуляторе предусмотрена система, включающая гидropневмопреобразователь, который способен создавать давление рабочей жидкости до 20 МПа и систему гидроцилиндров, встроенную в каждую самофиксирующуюся коническую муфту шарниров.

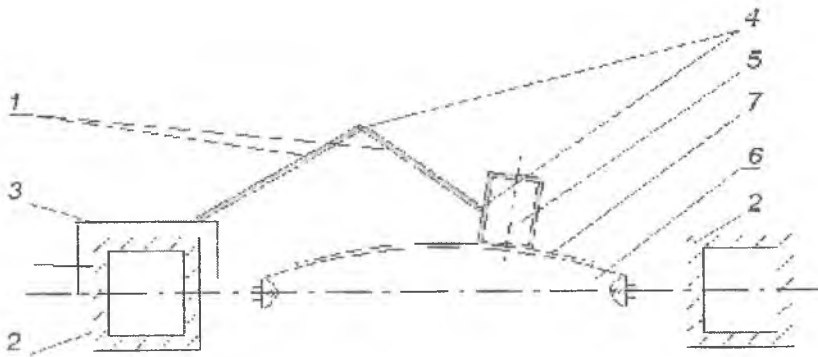


Рисунок 7.7. Принципиальная схема манипулятора: 1 – звенья манипулятора; 2 – рама стапеля; 3 – трубочина; 4 – шарниры; 5 – рабочий орган (сверлильная установка или магнитно – импульсный блок); 6 – ложемент; 7 – деталь

Процесс образования отверстий в деталях из трехслойных конструкций, обшивки которых выполнены из полимерных композиционных материалов, требует решения ряда задач, связанных с обеспечением качества кромки отверстия на входе и выходе сверла, а также с образованием пылевидной стружки, значительно ухудшающей экологическую обстановку рабочих мест. В результате решения поставленных задач разработано [9] специальное устройство (рис. 7.8) для образования отверстий в трехслойных конструкциях, предназначенное для размещения на манипуляторе.

Данное устройство состоит из корпуса 1, в котором размещен пневмодвигатель с редуктором 2. Корпус 1 имеет воздуховод 3, предназначенный для отвода отработанного воздуха и эвакуации пылевидной стружки. На шпинделе редуктора установлен трехкулачковый патрон 4, в котором закрепляется сверло 5. На корпусе 1 размещена пружина 6 и контактирующий с ней кондуктор 7, служащий для фиксации оси сверла 5 и прижима детали, необходимого для получения качественных отверстий. Кроме того на корпусе размещен подпружиненный треножник 8, способствующий установки оси устройства по нормали к поверхности обрабатываемой детали 9.

Устройство для получения отверстий соединено с манипулятором посредством сферического шарнира 10, который имеет зажимное устройство. Для обеспечения подачи режущего инструмен-

та корпус 1 устройства соединен с шарниром через направляющие 12 и контактирует с устройством подачи 13. Для установки оси устройства согласно предварительно нанесенной на деталь разметки осей отверстий с резьбой, на корпусе 1 размещен лазерный указатель 14.

Процесс образования отверстий под установку резьбового вкладыша заключается в следующем. На ложементах 6 сборочного приспособления (рис. 7.7) фиксируется обрабатываемая деталь 7 (фиксирующие устройства условно не показаны). Затем включается система расфиксации шарниров манипулятора и устройство для образования отверстия 5 по пятну лазерного указателя устанавливается согласно разметки. Причем, треножник 8 (рис. 7.8) устройства обеспечивает автоматическую перпендикулярную установку оси устройства относительно поверхности обрабатываемой детали. Система расфиксации шарниров манипулятора включается и происходит фиксация оси устройства по оси подготавливаемого отверстия. На пневмодвигатель 2 подается сжатый воздух, вследствие этого приводится во вращение сверло 5. С помощью устройства подачи 13 корпуса I кондуктор 7 взаимодействует с обрабатываемой деталью и происходит сверление отверстия. Отработанный воздух, поступая в зону сверления, которая заключена в замкнутый объем, сдувает образующуюся пылевидную стружку, улавливаемую подключенным к установке пылесосом. По окончании процесса сверления пневмодвигатель останавливают и устройство приводят в исходное положение.

При постановке в полученное отверстие резьбового вкладыша используется инструментальная головка с магнитно-импульсным приводом (рис. 7.9), которая также может быть закреплена к шарнирному двухзвеннику. Она состоит из направляющего корпуса 9, индуктора 6, бойка 7 и пружины 10. В работе инструментальной головки используется энергия, запасенная в батарее высоковольтных конденсаторов 3. При разряде конденсаторной батареи через неподвижный индуктор 6 возбуждается импульсное магнитное поле, которое инициирует в метаемом теле (бойке 7) ток. Взаимодействие импульсного магнитного поля индуктора 6 с полем, образованным током в бойке, создает ускоряемую силу. В результате в инструментальной головке происходит непосредственное преобразование электрической энергии, запасенной в конденсаторах, в кинетиче-

скую энергию бойка 7, а затем и в работу деформации материала вкладыша. После удара о деформирующий пуансон боек 7 с помощью пружины 8 возвращается в исходное положение.

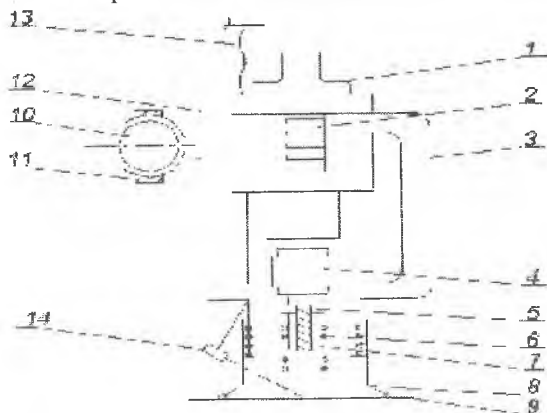


Рисунок 7.8. Схема устройства для образования отверстий:
 1 – корпус; 2 – пневмодвигатель; 3 – воздуховод; 4 – патрон; 5 – сверло;
 6 – пружина; 7 – кондуктор; 8 – позиционирующее устройство;
 9 – обрабатываемая деталь; 10 – шарнир; 11 – зажимное устройство;
 12 – направляющие; 13 – устройство подачи; 14 – лазерное устройство

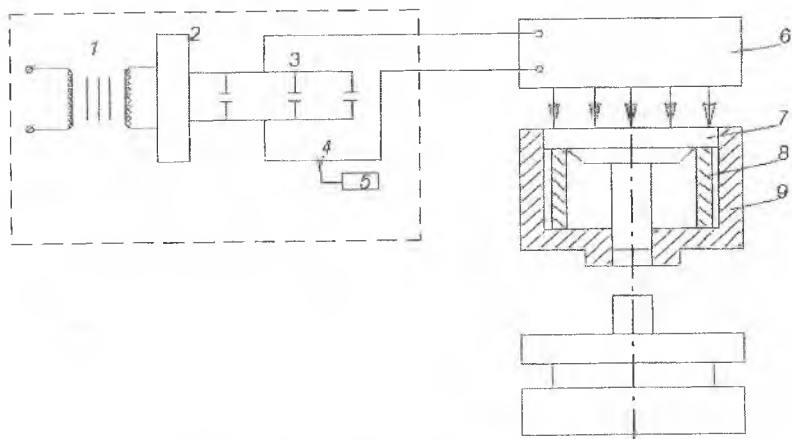


Рисунок 7.9. Принципиальная схема инструментальной головки с магнитно – импульсным приводом:
 1 – трансформатор; 2 – выпрямитель; 3 – конденсаторная батарея; 4 – разрядник;
 5 – регулятор запасаемой энергии; 6 – индуктор; 7 – ударник;
 8 – возвратная втулка; 9 – направляющий корпус

В качестве источника энергии разработан специальный переносной магнитно-импульсный энергетический блок с номинальным напряжением в несколько киловольт. Он позволяет от небольшого источника накопить достаточную энергию и затем, при разряде, сконцентрировать ее в небольшом объеме и, тем самым, повысить полезную мощность и энергию удара, приходящую на единицу веса ударного узла.

Проведенные в работе исследования [3] показали, что коэффициент полезного действия всей инструментальной головки выше в случае, если ударник и пуансон штамповой оснастки отделены друг от друга на определенном расстоянии. Кроме того, данный вариант более универсален и позволяет перейти на другой типоразмер путем замены оснастки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барвинок, В.А. Сборочные, монтажные и испытательные процессы в производстве летательных аппаратов/В.А.Барвинок, В.И.Богданович, П.А. Бордаков, Б.П. Пешков, И.Н. Желтов. И.А. Докукина.- М.: Машиностроение, 1996, -523с
2. Барвинок, В.А. Разработка математической модели технологического процесса постановки резьбового вкладыша в отверстие трехслойной конструкции. В.А.Барвинок, Ю.А.Вашуков, Н.Ю.Поникарова, О.В.Ломовской //Сборка в машиностроении, приборостроении. -2001. - №3. - С.26-29.
3. Барвинок, В.А. Разработка оборудования с использованием магнитно – импульсного привода и материалов с эффектом памяти формы для сборки трехслойных конструкций изделий авиакосмической техники. В.А. Барвинок, Ю.А. Вашуков, Н.Ю. Поникарова, О.В. Ломовской, А.Н.Кирилин // Известия Самарского научного центра РАН. – 2001. – Т3. - №2. - с. 192 – 196.
4. Братухин, А.Г. Современные технологии авиастроения. А.Г.Братухин, Ю.Л.Иванова.-М.: Машиностроение, 1999.-832с.
5. Буланов И.М. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов. И.М.Буланов. В.В. Воробей. - М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998.- 511с.
6. Вашуков, Ю.А. Технологические особенности получения отверстий в деталях и узлах летательных аппаратов из полимерных композиционных материалов/ учеб. пособие: Ю.А.Вашуков, А.С. Горячев, В.П.Самохвалов.-Самара: Самар. Аэрокосм. ун-т, 1996. 44с
7. Вашуков, Ю.А. Моделирование деформированного состояния подкрепляющего элемента при его постановке в отверстие листовой детали из КМ/ Ю.А.Вашуков //Проблемы машиностроения и автоматизации. 2004. - №2. С.62 – 65.
8. Вашуков, Ю.А. Разработка и исследование технологии подкрепления элементов конструкции ЛА из ПКМ в зоне отверстия. – Дис.канд.техн.наук., Самара: Самарский авиационный институт, 1991. – 197 с.
9. Вашуков, Ю.А., Поникарова Н.Ю. Оценка эффективности трехслойных конструкций с учетом соединительных вкладышей/

Ю.А.Вашуков, Н.Ю.Поникарова //Проблемы машиностроения и автоматизации. 2006. - №1. С.89 – 92.

10. Вашуков Ю.А., Пересыпкин В.П., Пересыпкин К.В., Никоноров Н.Н. Конечно-элементное моделирование напряженного состояния при подкреплении отверстия в элементах конструкций из полимерных композиционных материалов/ Ю.А.Вашуков, В.П.Пересыпкин, К.В. Пересыпкин, Н.Н. Никоноров // Известия Самарского научного центра РАН, т 7, №2, 2005.- С.436-441.

11. Воробей В.В., Сироткин О.С. Соединение конструкций из композиционных материалов. - Л.: Машиностроение. 1985. – 168 с.

12. Догматырский, Б.А. Болтовые и заклепочные соединения конструкций из стеклопластиков/Б.А.Догматырский, О.С.Сироткин, А.И.Ярковец -М.: МАИ, 1972.-100 с.

13. Эндогур, А.И. Сотовые конструкции. Выбор параметров и проектирование/ А.И.Эндогур.- М.: Машиностроение. 1986. – 199 с.

14. Комаров, Г.Ф. Способы соединения деталей из пластических масс/ Г.Ф.Комаров.- М.: Химия, 1979.- 287с.

15. Крысин В.В., Крысин М.В. Технические процессы формования, намотки и склеивания конструкций/ В.В.Крысин, М.В.Крысин. – М.: Машиностроение, 1989. – 240 с.

16. Леонова, И.Е., Семин М.И. Экспериментальное исследование анизотропии прочности болтовых соединений слоистых композитов при варьировании геометрическими и конструктивными параметрами/И.Е. Леонова, М.И.Семин // Механика композитных материалов. – 1990. - №2. – с. 268 – 278.

17. Лехницкий, С.Г. Теория упругости анизотропного тела/ С.Г.Лехницкий.- М.: Наука, 1977. - 416 с.

18. Литвинов, В.Б. Технология выполнения высокопрочного соединения лопасти из композиционных материалов со втулкой несущего винта вертолета. – Диссертация на соискание ученой степени к.т.н., М.: МАИ, - 1986. – 189 с.

19. Молодцов, Г.А. Применение современных композиционных материалов в самолетостроении/ Г.А. Молодцов – М.: МАИ, 1984. – 52 с.

20. Мусхелишвили, Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости/ Н.И.Мусхелишвили - М.: “Наука” 1966. – 583 с.

21. Некрасов, О.А. Выносливость болтовых металло-композитных соединений с предварительной затяжкой/О.А Некрасов, В.Н.Захаров // Вестник машиностроения, 1989, №6. – с.14 – 16.

22. Полилов, А.И. Оценка прочности многорядных заклепочных соединений армированных пластиков/А.И.Полилов // Машиностроение. – 1985. - №1. – С. 95 – 97.

23. Прохоров, Б.Ф. Трехслойные конструкции в машиностроении/ Б.Ф.Прохоров, В.Н.Кобелев,- «Судостроение», Л.: 1972.- 344с.

24. Резьбовой вкладыш для облегчения панелей. Unsert fastener in light panel. Higgins Williamr. ATR. International Jug. Патент США 4729705. Заявл. 02.02.07 №9966. Оpubл. 08.03.88. МКИ F16B 39/03.

25. Семин, М.И. Расчеты соединений элементов конструкций из композиционных материалов на прочность и долговечность / М.И.Семин, Д.В.Стреляев. – М.: Издательство МГАТУ “ЛАТМЭС” 1996. – 288 с

26. Савин, Г.Н., Тульчий В.И. Пластинки, подкреплённые составными кольцами и упругими накладками/Г.Н. Савин, В.И. Тульчий.-Киев.: Наукова думка, 1971. – 268 с.

27. Семин, М.И. Заклепочные и болтовые соединения композиционных материалов/М.И.Семин.- М.: Машиностроение.1989.– 44 с.

28. Степанов, А.А. Обработка резанием высокопрочных полимерных композиционных материалов/ А.А.Степанов.- М.: Машиностроение, 1987. – 176 с.

29. Труфанов, А.А. Коваленко В.И. Влияние усилия затяжки на малоцикловую усталость болтовых соединений /А.А. Труфанов, В.И.Коваленко // Проблемы прочности. 1987. №5. – С. 36 – 44.

30. Ушаков, А.Е. Выбор рационального подкрепления конструктивных вырезов в углепластиковых панелях /А.Е. Ушаков // Механика композитных материалов. – 1989. - №4. – С. 688 – 694.

31. Царахов, Ю.С. Конструирование соединений элементов ЛА из композиционных материалов / Ю.С.Царахов.- М.: МАТИ. 1980. -- 82с.

32. Цыплаков, О.Г. Конструирование изделий из композиционных волокнистых материалов / О.Г.Цыплаков.- Л.: Машиностроение. 1984. – 140 с.

Учебное издание

Вашуков Юрий Александрович

**ОСОБЕННОСТИ СБОРКИ ДЕТАЛЕЙ
ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
В КОНСТРУКЦИЯХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ
АППАРАТОВ**

Учебное пособие

Технический редактор В. К. Моисеев
Редакторская обработка Н. С. Куприянова
Корректорская обработка А. А. Печитайло
Доверстка В. С. Телепова

Подписано в печать 29.11.07. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Печ. л. 4,25.

Тираж 120 экз. Заказ 207. ИП-ж57/2007

Самарский государственный
аэрокосмический университет.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

Изд-во Самарского государственного
аэрокосмического университета.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.